



**Bruno Joel Simões  
Gonçalves**

**Formulações de argamassas controladoras de  
humidade ambiente**



**Bruno Joel Simões  
Gonçalves**

**Formulações de argamassas controladoras de  
humidade ambiente**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais por todo o apoio ao longo da minha vida.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Joaquim Manuel Vieira**

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

vogais

**Prof. Doutor João António Labrincha Batista**

Professor associado com agregação no Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro

**Doutor António Santos Silva**

Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC

**Prof. Doutora Isabel Margarida Miranda Salvado**

Professora associada do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro

**Eng.º Luís Miguel Cardoso da Silva**

Director de Marketing da Saint-Gobain Weber Portugal

## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor João Labrincha, pela partilha de conhecimento e equipamentos, por toda a disponibilidade e incentivo sempre presente no decorrer deste trabalho.

À empresa Saint-Gobain Weber Portugal – Argamassas Industriais, S.A., pela total disponibilidade na utilização de equipamentos e materiais, ao Eng.º Luís Silva, a todos os funcionários do laboratório, em especial ao Eng.º Nuno Vieira, Eng.º Hélder Gonçalves, Eng.º Pedro Sequeira e à minha colega Patrícia Linhares.

À Eng.ª Maria Carlos do Departamento de Engenharia Civil por toda a disponibilidade demonstrada ao longo do presente trabalho.

A todos os meus colegas e amigos que sempre me apoiaram, motivaram e animaram ao longo da vida académica.

À minha família por todo o apoio e incentivo demonstrado ao longo destes anos.

À Carina pelo carinho, apoio e compreensão ao longo de todos estes anos.

A todos muito obrigado!

## **palavras-chave**

Argamassa, humidade relativa, vermiculite expandida, pós expansivos de alumínio, poliacrilato de sódio, MBV, porosidade.

## **resumo**

No presente trabalho utilizou-se argamassas de estrutura porosa para controlo da humidade relativa em meios fechados. À argamassa padrão, à base de cal aérea e cimento, adicionou-se vários adjuvantes, em proporções distintas. Os adjuvantes utilizados foram a vermiculite expandida, pós expansivos de alumínio e o poliacrilato de sódio, de forma a alterar a estrutura porosa da argamassa.

A introdução dos referidos adjuvantes provoca alterações nas propriedades da argamassa, como tal, as diversas formulações foram sujeitas a testes em fresco e no estado endurecido. Com a argamassa no estado fresco determinou-se a % de água de amassadura, % de ar incluído e a densidade. No estado endurecido a argamassa foi avaliada em relação à variação de massa e dimensional, módulo de elasticidade, resistência à flexão e compressão, coeficiente de absorção de água por capilaridade, coeficiente de resistência à difusão de vapor, porosimetria de mercúrio, saturação/libertação de água, condutividade térmica e controlo de humidade (MBV – Moisture Buffer Value).

A determinação do MBV foi segundo os parâmetros estabelecidos pelo NordTest, onde a amostra é exposta durante 8 horas a 75% de humidade relativa e 16 horas a 33% de humidade relativa, a 23°C durante cinco dias. Aferiu-se também, a coerência dos resultados obtidos em trabalhos anteriores e no presente do controlo de humidade, através do uso de materiais já estudados no projecto NordTest.

**keywords**

Mortar, relative humidity, expanded vermiculite, aluminum expansive powders, sodium polyacrylate, MBV, porosity.

**abstract**

In this study mortars with porous structure were used to control the relative humidity in a closed environment. To the standard mortar, based on lime and cement, various adjuvants were added in different proportions. The adjuvants used were expanded vermiculite, aluminum expansive powders and sodium polyacrylate, in order to change the porous structure of the mortar. The introduction of these adjuvants changes the properties of mortar, as such as different formulations were subjected to tests on fresh and hardened state. The % of mixing water, % of air included and density were determined for the fresh mortar. The hardened mortar was evaluated in relation to the weight and size changes, elasticity modulus, flexural and compressive strength, water absorption coefficient due to capillary action, water vapor diffusion resistance coefficient, mercury porosimetry, water saturation/release, thermal conductivity and humidity control (MBV – Moisture Buffer Value). The determination of the MBV was within the parameters established by NordTest project, where the sample is exposed for 8 hours at 75% relative humidity and 16 hours at 33% relative humidity at 23°C for five days. The consistency of the results obtained in this study and previous works, was checked using materials already studied by NordTest project.





## Índice geral

<b>Índice de tabelas</b>	xii
<b>Índice de figuras</b>	xiii
<b>1. Enquadramento e objectivos</b>	1
<b>2. Introdução teórica</b>	3
2.1. Argamassas	3
2.2. Evolução histórica das argamassas	3
2.3. Classificação das argamassas	4
2.3.1. Argamassas de alvenaria	4
2.3.2. Argamassas de revestimento	5
2.3.3. Cimentos-cola	6
2.3.4. Argamassas para juntas	6
2.3.5. Argamassas de suporte de pavimento	6
2.4. Constituintes das argamassas	6
2.4.1. Agregados	7
2.4.2. Ligantes	7
2.4.2.1. Ligantes de cimento Portland	7
2.4.2.2. Ligantes de cal	9
2.4.2.3. Ligantes de gesso	11
2.4.3. Adjuvantes e aditivos	12
2.4.3.1. Hidrófugos e impermeabilizantes	12
2.4.3.2. Plastificantes	12
2.4.3.3. Aceleradores e retardadores de presa	13
2.4.3.4. Promotores de aderência	13
2.4.3.5. Agentes introdutores de ar	13
2.4.3.6. Fungicidas	14
2.4.3.7. Pigmentos	14

2.4.3.8. Fibras	14
2.4.3.9. Agentes expansivos	15
2.4.3.10. Cargas leves	15
2.4.4. Aditivos/ adjuvantes utilizados para controlar a retenção/ libertação de humidade	16
2.4.4.1. Vermiculite expandida	16
2.4.4.2. Pós expansivos de alumínio	17
2.4.4.3. Poliacrilato de sódio	18
2.5. Transferência de humidade em materiais porosos	19
2.5.1. Humidade	19
2.5.2. Higroscopicidade dos materiais porosos	21
2.5.3. Adsorção e desadsorção de humidade	22
2.5.4. Histerese	24
2.6. Avaliação da capacidade de controlo de humidade em materiais de construção	25
2.6.1. Diferentes níveis do controlo de humidade	26
2.6.2. Efusividade da humidade	27
2.6.3. MBV ideal	27
2.6.4. MBV prático	28
2.6.5. Classificação dos materiais pelo método NordTest	29
<b>3. Procedimento experimental</b>	<b>30</b>
3.1. Argamassa padrão e novas formulações	30
3.2. Preparação do amassado	31
3.3. Caracterização das argamassas	32
3.3.1. Caracterização no estado fresco	33
3.3.2. Caracterização da argamassa endurecida	35
<b>4. Apresentação e discussão dos resultados</b>	<b>44</b>
4.1. Aferição do método de determinação do MBV prático	44
4.2. Propriedades das argamassas em fresco	48
4.3. Propriedades das argamassas endurecidas	50

4.3.1. Variação de massa	50
4.3.2. Variação dimensional	51
4.3.3. Densidade aparente	52
4.3.4. Porosidade	53
4.3.5. Módulo de elasticidade	55
4.3.6. Resistência mecânica	56
4.3.7. Coeficiente de absorção de água por capilaridade	57
4.3.8. Coeficiente de resistência à difusão de vapor	59
4.3.9. Saturação/ liberação de água	60
4.3.10. MBV prático	69
4.3.11. Condutividade térmica	73
<b>5. Conclusão e propostas futuras</b>	<b>75</b>
<b>6. Bibliografia</b>	<b>78</b>
<b>Anexos</b>	<b>83</b>

## Índice de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Intervalos de classificação do MBV prático	29
<b>Tabela 2:</b> Valores do MBV prático de vários materiais	29
<b>Tabela 3:</b> Composição da argamassa padrão	30
<b>Tabela 4:</b> Composições das várias formulações	31
<b>Tabela 5:</b> Ensaios efectuados às várias formulações	33
<b>Tabela 6:</b> Valores do MBV prático do projecto NordTest e do presente trabalho	46
<b>Tabela 7:</b> Valores dos declives, correlações e tempos de estágio	63
<b>Tabela 8:</b> Compilação dos resultados dos gráficos de libertação de água	68

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Aplicação de argamassa de alvenaria	4
<b>Figura 2:</b> Aplicação duma argamassa de revestimento monocamada	5
<b>Figura 3:</b> Argamassa cimento-cola	6
<b>Figura 4:</b> Processo de clinquerização do cimento tipo Portland	8
<b>Figura 5:</b> Processo de hidratação do cimento tipo Portland	9
<b>Figura 6:</b> Ciclo da cal aérea	10
<b>Figura 7:</b> Fases na preparação da cal hidráulica durante o tratamento térmico	10
<b>Figura 8:</b> a) vermiculite antes da fragmentação e tratamento térmico; b) vermiculite após a fragmentação e tratamento térmico	16
<b>Figura 9:</b> Imagens de SEM da evolução das lamelas de vermiculite em função da temperatura; a) à temperatura ambiente; b) a 300 °C; c) a 600 °C; d) a 900 °C	17
<b>Figura 10:</b> a) estrutura química do poliacrilato de sódio; b) processo de osmose	18
<b>Figura 11:</b> Aparecimento de bolor devido a humidade	19
<b>Figura 12:</b> Balanço de humidade relativa no interior de um edifício	20
<b>Figura 13:</b> Higroscopicidade de materiais porosos mediante a humidade relativa do meio	21
<b>Figura 14:</b> Etapas de fixação de humidade do interior dos poros; a) adsorção monomolecular, b) adsorção plurimolecular, c) condensação capilar	22
<b>Figura 15:</b> Curvas de adsorção isotérmica, a temperatura constante; a) em função da pressão parcial vapor de água, b) em função da humidade relativa	23
<b>Figura 16:</b> Histerese das curvas de adsorção e desadsorção	24
<b>Figura 17:</b> Efeito do ângulo de contacto na histerese	24
<b>Figura 18:</b> Ilustração descritiva dos três níveis de controlo de humidade num compartimento fechado	26
<b>Figura 19:</b> Ciclo experimental para o cálculo de MBV prático	28
<b>Figura 20:</b> Equipamento utilizado no processo de amassadura	32
<b>Figura 21:</b> Equipamento utilizado para a medição da percentagem de ar incluído	34
<b>Figura 22:</b> Provetes produzidos para a realização dos diversos ensaios	35
<b>Figura 23:</b> Micrómetro utilizado para medir as variações métricas	36
<b>Figura 24:</b> Equipamento utilizado para medir a frequência de ressonância	37

<b>Figura 25:</b> Equipamento de ensaios de resistência à flexão e compressão	38
<b>Figura 26:</b> Aparato para o cálculo do coeficiente de absorção de água por capilaridade	39
<b>Figura 27:</b> Aparato do conjunto durante a etapa de pesagem	40
<b>Figura 28:</b> a) vista do interior da câmara; b) vista do exterior da câmara	41
<b>Figura 29:</b> Vista geral do ensaio para a determinação do MBV prático	42
<b>Figura 30:</b> Aparelho utilizado para determinar a condutividade térmica	43
<b>Figura 31:</b> Variação temporal da massa de uma amostra de betão perante variações cíclicas de humidade	44
<b>Figura 32:</b> Variação temporal da massa de uma amostra de contraplacado perante variações cíclicas de humidade	45
<b>Figura 33:</b> Variação temporal da massa de uma amostra de gesso perante variações cíclicas de humidade	45
<b>Figura 34:</b> Variação temporal da massa de uma amostra de betão com espessura igual a 25mm perante variações cíclicas de humidade	46
<b>Figura 35:</b> Esquema exemplificativo da penetração máxima de humidade e da perda de humidade ao longo dos ciclos	47
<b>Figura 36:</b> Variação temporal da massa de uma amostra de betão com área de exposição igual a $0,025\text{m}^2$ perante variações cíclicas de humidade	48
<b>Figura 37:</b> % de água e de ar incluído em cada amassado	48
<b>Figura 38:</b> Densidade dos diversos amassados	50
<b>Figura 39:</b> Variação da massa ao fim de 7 e 28 dias	51
<b>Figura 40:</b> Variação dimensional das amostras ao fim de 7 e 28 dias de cura	52
<b>Figura 41:</b> Densidade das argamassas ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura	53
<b>Figura 42:</b> % de porosidade das diversas amostras ao fim de 28 dias de cura	54
<b>Figura 43:</b> Valores do diâmetro médio da área e do volume dos poros de cada amostra	55
<b>Figura 44:</b> Valores do módulo de elasticidade das argamassas curadas durante 7 e 28 dias	56
<b>Figura 45:</b> Resistência à flexão das argamassas curadas durante 28 dias	57
<b>Figura 46:</b> Resistência à compressão das argamassas curadas durante 28 dias	57

<b>Figura 47:</b> Pressão de ascensão capilar em função do raio do poro	58
<b>Figura 48:</b> Coeficiente de absorção de água por capilaridade de amostras curadas durante 28 dias	59
<b>Figura 49:</b> Resultados do coeficiente de resistência à difusão de vapor das diversas formulações	60
<b>Figura 50:</b> Resultados do teste de saturação; a) amostra padrão; b) padrão + 5% vermiculite expandida	61
<b>Figura 51:</b> Resultados do teste de saturação; a) padrão + 7% vermiculite expandida; c) padrão + 0,1% agente expandido	61
<b>Figura 52:</b> Resultados do teste de saturação; a) padrão + 0,15% agente expansivo; b) padrão + 0,2% agente expansivo	61
<b>Figura 53:</b> Resultados do teste de saturação; a) padrão + 5% vermiculite expandida 0,1% agente expansivo; b) padrão + 0,5% poliacrilato de sódio	62
<b>Figura 54:</b> Resultados do teste de saturação; a) padrão + 1% poliacrilato de sódio; b) padrão + 2% poliacrilato de sódio	62
<b>Figura 55:</b> Quantidade de água absorvida pelas diversas amostras	65
<b>Figura 56:</b> Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão; b) padrão + 5% de vermiculite expandida	66
<b>Figura 57:</b> Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 7% vermiculite expandida; b) padrão + 0,1% agente expansivo	66
<b>Figura 58:</b> Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 0,15% agente expansivo; b) padrão + 0,2% agente expansivo	66
<b>Figura 59:</b> Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 5% vermiculite expandida + 0,1% agente expansivo	67
<b>Figura 60:</b> Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 1% de poliacrilato de sódio; b) padrão + 2% de poliacrilato de sódio	67
<b>Figura 61:</b> Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra A; b) amostra B1	69

<b>Figura 62:</b> Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra B2; b) amostra C1	70
<b>Figura 63:</b> Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra C2; b) amostra C3	70
<b>Figura 64:</b> Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra D; b) amostra E1	70
<b>Figura 65:</b> Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra E2; b) amostra E3	71
<b>Figura 66:</b> Valores do MBV prático das amostras curadas 28 dias	72
<b>Figura 67:</b> Valores de MBV estimados nas fases de adsorção e de libertação de humidade para as argamassas em estudo	73
<b>Figura 68:</b> Resultados da condutividade térmica das várias formulações após 28 dias de cura	74



## 1. Enquadramento e objectivos

A humidade relativa no interior de habitações ou espaços públicos é um parâmetro fundamental na avaliação da qualidade de vida dos que frequentam estes espaços. Valores inapropriados de humidade relativa nestes espaços afectam directamente a saúde de quem os utiliza, e interfere de forma significativa na produtividade das mesmas.

Para além dos problemas causados aos utilizadores destes espaços e, inerente deterioração do edifício, responsável pela maioria das reparações, os valores de humidade relativa desajustados significam deterioração de equipamentos, mobiliário e obras de arte presentes no interior dos espaços.

O presente trabalho segue uma linha orientadora de um trabalho anterior, onde se testou a capacidade de várias formulações no controlo de variações de humidade relativa (diárias). À argamassa de estrutura porosa adicionaram-se vários adjuvantes (vermiculite e perlite expandida, agentes expansivo e introdutores de ar) com o intuito de ajustar a porosidade (controlar a sua forma e a dimensão dos poros), de forma a melhorar o controlo de variações de humidade. As argamassas que apresentaram melhor desempenho foram aquelas em que se adicionou vermiculite expandida e agente expansivo, nomeadamente a argamassa com 5% de vermiculite expandida e a argamassa com 0,1% de agente expansivo. Estas argamassas foram alvo de novos ensaios (saturação e libertação de água e medição da condutividade térmica), para além de ensaios já realizados no dito trabalho (todos ensaios com o produto em pasta e o ensaio de controlo de humidade). A partir destas duas formulações foram desenvolvidas outras com ligeiras modificações na % de adjuvante adicionado.

Neste contexto, o presente trabalho partiu de uma argamassa de revestimento porosa à base de cal aérea e cimento, comercializada pela empresa *Saint-Gobain Weber Portugal – Argamassas Industriais, S.A.* A que se adicionou adjuvantes (vermiculite expandida, pós expandidos de alumínio e poliacrilato de sódio) de forma a otimizar a capacidade de regular a variação de humidade relativa. As várias formulações foram

caracterizadas a nível mecânico, condutividade térmica e controlo de humidade (MBV prático).

Outro objectivo do presente trabalho é aferir os resultados obtidos na câmara climática na Universidade de Aveiro (Departamento de Engenharia Civil) utilizada para determinar a capacidade das várias formulações em controlar a humidade relativa. Para tal utilizaram-se materiais já testados no projecto NordTest, comparando-se os valores. O projecto NordTest envolve a medição da quantidade de água que é transportada para o interior ou exterior da superfície do material, durante um período de tempo, quando este é sujeito a variações de humidade relativa no meio envolvente. Este tipo de ensaio permite quantificar a capacidade de um material a regularizar as variações de humidade na atmosfera de um compartimento fechado.

## **2. Introdução teórica**

### **2.1. Argamassas**

Uma argamassa é constituída por fragmentos de rocha envolvidos por um ligante que lhe confere solidez e dá forma. Existem dois tipos de ligantes: orgânicos e inorgânicos. A classificação da argamassa pode ser feita mediante o número de ligantes presentes na sua constituição. Assim sendo, existem argamassas de um só ligante e argamassas bastardas, nas quais são utilizados mais do que um ligante inorgânico. A argamassa é ainda constituída por agregados (areia ou pó de pedra) e aditivos/adjuvantes. Classifica-se como aditivo se a % de uma substância adicionada for superior a 5% da massa do ligante, caso seja inferior designa-se por adjuvante. Actualmente, as formulações de argamassas industrializadas apresentam uma combinação complexa de aditivos e adjuvantes, de modo a obter as melhores propriedades físico-químicas.

### **2.2. Evolução histórica das argamassas**

Os primeiros registos de argamassas utilizadas pelo homem na construção datam da pré-história, mais concretamente há cerca de 11000 anos na Galileia. O material utilizado era a lama como meio de junção de tijolos de lama seca e pedras. No entanto, esta técnica não conferia estabilidade e segurança às construções, daí a necessidade de desenvolver novas argamassas. Na Babilónia, há cerca de 6000 anos, foi criada uma argamassa à base de cal, gesso, areia, fragmentos de pedras, de modo a obter um material mais plástico e que desse maior estabilidade às construções [1,2,3,4].

Há cerca de 2700 anos, os Romanos decidiram incorporar um material de cor escura abundante na bacia de Nápoles, mais precisamente da localidade de Pozzuoli. Esse material de cor escura era pozolana natural (cinzas vulcânicas), materiais siliciosos ou silico-aluminosos e conferem às argamassas um elevado carácter hidráulico, presa rápida, para além de uma superior impermeabilidade, sendo óptima para usar em rebocos exteriores. Actualmente existem também pozolanas artificiais que resultam do processo de queima a temperaturas específicas de material de composição adequada. Entre as

pozolanas artificiais mais comuns encontram-se as cinzas volantes, sílica de fumo, cinzas de casca de arroz, caulino calcinado a cerca de 750-800°C (designa-se metacaulino) e argila comum calcinada a temperatura próxima dos 900°C. A introdução de adjuvantes nas argamassas remonta ao tempo da Idade Média, com a utilização de gorduras, sabão ou resinas [1,2,3,4].

A cal começou a ser utilizada pelos gregos, proveniente da calcinação de calcários. Inicialmente misturavam-na com areia e só mais tarde com terra de *Santorini*, que é uma pozolana, obtendo assim um ligante hidráulico. No entanto, foram os Romanos que lhe deram maior utilização e divulgação. Utilizavam pedras de cor branca (calcária) da região de Pádua, juntamente com a pozolana existente na bacia de Nápoles [2,3].

Em 1824, o inglês Joseph Aspdin regista uma patente do desenvolvimento de um ligante hidráulico à base de argila e da calcinação de calcário. Pelo facto de a cor da mistura ser muito parecida com as pedras da ilha de Portland, esta foi denominada como cimento Portland. Ao longo dos tempos foram-se desenvolvendo cimentos com melhores propriedades, de forma a satisfazer as necessidades da construção [1,2,3,4].

### 2.3. Classificação das argamassas

As argamassas são classificadas mediante a sua aplicação em cinco categorias: argamassas de alvenaria, de revestimento, cimentos-cola, argamassas para juntas e argamassas de suporte para pavimentos.

#### 2.3.1. Argamassas de alvenaria

Este tipo de argamassa é utilizado na construção de muros e paredes de tijolo ou bloco, são constituídas por cal e maioritariamente por cimento, tendo como função garantir a união e estabilidade entre os componentes (figura 1). Entre os principais requisitos que esta argamassa tem que oferecer estão a resistência



**Figura 1:** Aplicação de argamassa de alvenaria [5].

mecânica, a capacidade de suprimir os movimentos causados por tensões mecânicas, gradientes térmicos e humidade [2].

### 2.3.2. Argamassa de revestimento

As argamassas de revestimento são empregues no revestimento interior ou exterior de muros ou paredes (figura 2). Este tipo de argamassas pode ser dividido em formulações de estuque ou de reboco. Como reboco, as argamassas de revestimento funcionam como uma camada protectora, plana e regular, podendo ser sujeita a um posterior tratamento decorativo. Quando o ligante principal é essencialmente gesso, as argamassas são consideradas estuque, tendo funções decorativas e de revestimento. Existe uma grande diversidade de argamassas de revestimento, variando entre elas os valores de resistência mecânica e a porosidade [3].



**Figura 2:** Aplicação duma argamassa de revestimento monocamada [6].

A aplicação tradicional das argamassas de revestimento envolve mais de uma camada; a primeira camada tem como objectivo promover a aderência das camadas seguintes, sendo normalmente denominada por chapisco. As camadas seguintes (emboço e acabamento) são aplicadas com o objectivo de promover a regularização, protecção e acabamento superficial. As argamassas de revestimento em monocamada são produzidas em fábrica, sendo só necessário adicionar a quantidade adequada de água para formar o amassado. São aplicadas por projecção (figura 2) e substituem as várias camadas do reboco tradicional.

De acordo com o tema deste trabalho, será dada atenção a este tipo de argamassa de revestimento monocamada, especialmente às que apresentam maior capacidade de reter e libertar vapor de água. No entanto, estas não devem apresentar uma elevada capacidade de retenção de vapor de água, pois proporcionam o aparecimento de fungos e musgos. Uma baixa capacidade de adsorção de vapor de água não é de todo desejável, pois permite a

absorção de água por parte dos elementos de alvenaria, para além de diminuir a qualidade de vida de quem habita nesse espaço físico.

### 2.3.3. Cimentos-cola

Os cimentos-cola são um tipo de argamassa utilizados para colar elementos cerâmicos directamente sobre reboco, chão ou parede (figura 3). Para a sua aplicação basta juntar a quantidade desejável de água a este produto de fábrica, de maneira a ficar com a trabalhabilidade apropriada. Esta argamassa é constituída essencialmente por uma mistura de ligantes hidráulicos, agregados e aditivos orgânicos [2].



**Figura 3:** Argamassa cimento-cola [7].

### 2.3.4. Argamassas para juntas

As argamassas para juntas são utilizadas no preenchimento dos espaços entre os elementos cerâmicos aplicados sobre chão ou parede. Devem apresentar resistência à abrasão, serem impermeáveis e podem ainda desempenhar uma função estética – coloração distinta.

### 2.3.5. Argamassas de suporte de pavimentos

São utilizadas para nivelar e alisar superfícies de aplicação de pavimento e devem apresentar elevada resistência à compressão, característica conseguida essencialmente pelo uso de ligante como o cimento.

## 2.4. Constituintes das argamassas

As argamassas actualmente são constituídas por uma combinação mais ou menos complexa dos seguintes grupos de materiais: agregados, ligantes e aditivos ou adjuvantes.

### 2.4.1. Agregados

Os agregados são o constituinte maioritário na formulação de uma argamassa, sendo utilizadas vulgarmente areias siliciosas. No entanto, são também utilizados fragmentos cerâmicos, brita, cascalho e areias calcárias e argilosas. Em qualquer dos casos, devem apresentar características transversais, como inércia química, baixo coeficiente de expansão térmica, boa resistência mecânica e durabilidade. Como corpo da argamassa, qualquer modificação destas propriedades irá afectar directamente as propriedades da mistura [2,3,8].

Uma outra característica dos agregados com influência directa no desempenho das argamassas é a forma e tamanho das partículas. Os agregados naturais apresentam uma forma arredondada e lisa, com tamanhos de partículas algo próximos; por outro lado, os agregados que foram sujeitos a acções de fragmentação apresentam estrutura angulosa e tamanhos de partícula mais divergentes. Esta variedade de tamanhos e formas permite um melhor empacotamento, obtendo-se argamassas com menor porosidade e maior resistência mecânica [2,9,10].

### 2.4.2. Ligantes

Os ligantes são utilizados como meio de aglutinação de partículas aquando da adição de água. A grande maioria dos ligantes utilizados nas formulações de argamassas são de origem inorgânica, finamente moídos, que ganham presa e endurecem em virtude das reacções de carbonatação e/ou hidratação.

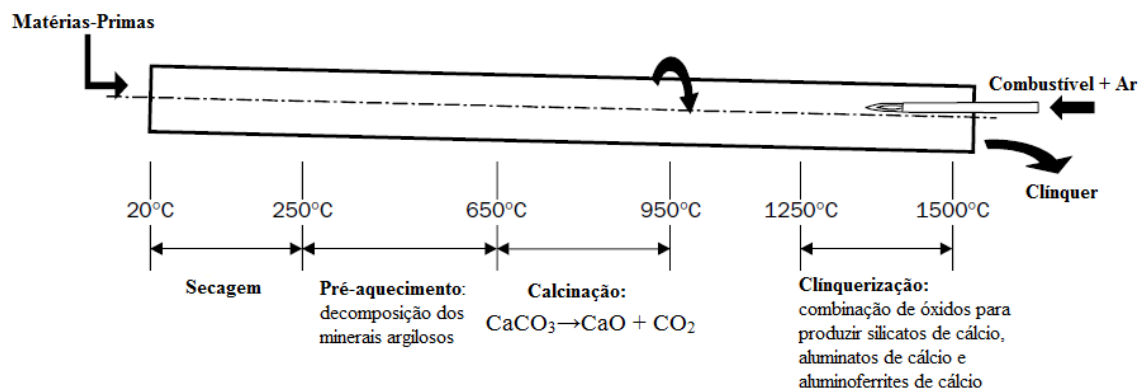
Entre os ligantes mais utilizados na produção de argamassas encontra-se o cimento portland, cal (cal aérea e cal hidráulica) e gesso.

#### 2.4.2.1. Ligante de cimento Portland

Hoje em dia, o cimento Portland é o ligante hidráulico mais utilizado em argamassas, pois é um produto relativamente barato, desenvolve elevada resistência

mecânica, apresenta durabilidade assinalável e um elevado poder de aglomeração de partículas. Ganha presa e endurece por hidratação, que tanto pode acontecer ao ar livre como em ambiente submerso [2,8].

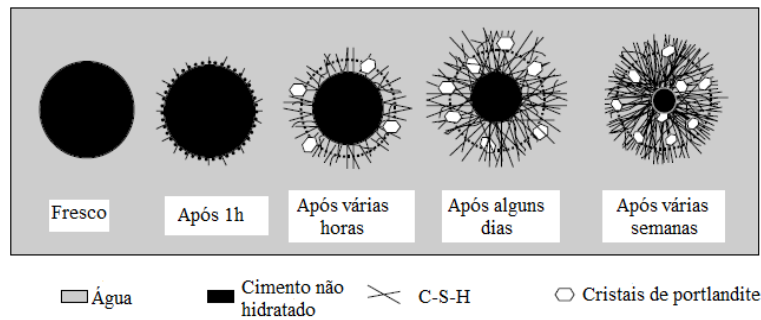
O cimento Portland é produzido a partir de uma combinação de matérias-primas inorgânicas calcárias e argilosas, ricas nos seguintes óxidos: cálcio (60-65%), silício (20-24%), alumínio (6-10%), ferro (até 3%) e magnésio (até 1%), que sofrem um tratamento térmico num forno rotativo (figura 4). A formação de clínquer inicia-se quando os componentes das argilas reagem com o óxido de cálcio proveniente do calcário, originando maioritariamente silicato tricálcico,  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ , silicato dicálcico  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ , em conjunto com menores percentagens de aluminato tricálcico  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$  e de aluminoferrite tetracálcica  $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$  [2,3,10,11,12].



**Figura 4:** Processo de clínquerização do cimento tipo Portland [10].

Na presença de água, os silicatos e aluminos-silicatos de cálcio formam produtos de hidratação constituídos por partículas fibrosas irregulares (silicato de cálcio hidratado ou C-S-H) que se cruzam entre si, formando também microcristais hexagonais de portlandite, que com o decorrer do tempo formam uma massa dura e resistente, designada por cimento hidratado. Na figura 5, está exemplificado o processo de hidratação do cimento Portland [10,13].





**Figura 5:** Processo de hidratação do cimento tipo Portland [10].

#### 2.4.2.2. Ligantes de cal

Os ligantes de cal dividem-se em dois grupos de acordo com a forma de endurecimento: (i) cal aérea, que endurece por carbonatação; (ii) cal hidráulica, que endurece por hidratação.

A cal aérea é um ligante que resulta da decomposição, por tratamento térmico, de uma rocha calcária com baixo índice de impurezas. Em função do teor de impurezas a cal aérea pode ser dividida em dois grupos – gorda e magra. Uma cal aérea gorda é constituída por carbonato de cálcio (99%) e por 1% de impurezas, apresentando uma cor branca; por sua vez, a cal aérea magra é constituída por 1 e 5% de impurezas e o restante de carbonato de cálcio, apresentando uma cor acinzentada. Apesar de não ser alvo de estudo neste trabalho, existe cal aérea de origem magnesiana e dolomítica, que apresentam características diferentes das apresentadas para a cal aérea de origem calcária [3,14,15].

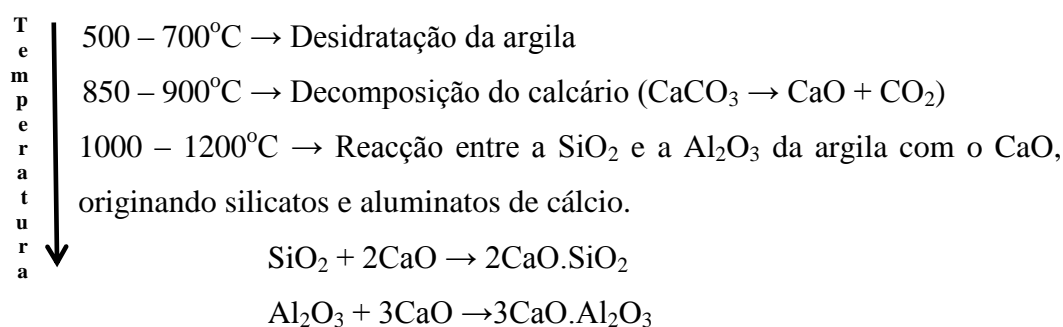
O tratamento térmico é realizado a temperaturas na ordem dos 900 a 1000 °C, pois nesta gama de temperaturas dá-se a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), obtendo-se óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), comumente conhecido como cal viva. A cal viva tende a reagir facilmente com a água, gerando hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), conhecido como cal apagada. Mediante a quantidade de água que é adicionada à cal viva obtém-se cal apagada em pasta ou em pó. Todo o processo de obtenção de cal aérea é reversível, mesmo quando lhe são adicionados agregados (normalmente areia) para se formar uma argamassa, como se pode observar na figura 6 [3,14,15].



**Figura 6:** Ciclo da cal aérea [14].

A cal aérea não ganha presa nem endurece em água, sendo utilizada em várias aplicações na construção, como em argamassas de reboco, misturada com gesso para a formulação de estuque e na caiação de muros.

A cal hidráulica apresenta a capacidade de fazer presa e endurecer quando em contacto directo com água ou com o ar. Este tipo de ligante é formado maioritariamente por pedra calcária ( $\text{CaCO}_3$ ) e por uma percentagem variável entre 8 a 20% de argila. Quando sujeita a tratamento térmico entre 1000 e 1250 °C ocorre reacção entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), dando origem à cal hidráulica. À medida que o tratamento térmico vai evoluindo, observam-se três fases distintas na preparação da cal hidráulica (figura 7) [1,14,15,16].



**Figura 7:** Fases na preparação da cal hidráulica durante o tratamento térmico [14].

A cal hidráulica é constituída por silicatos e aluminatos de cálcio, hidratáveis, e por cerca de 3 a 10% de cal viva ( $\text{CaO}$ ), que vai ser extinta. O endurecimento da cal hidráulica ocorre em duas etapas; na primeira ocorre a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio;

na segunda, designada por fase aérea ocorre a carbonatação do hidróxido de cálcio [1,14,15,16].

Por norma, a cal hidráulica apresenta características intermédias, se comparada com os ligantes de cimento Portland e de cal aérea. Assim sendo, estas apresentam baixa resistência à compressão e à flexão, ainda que os valores sejam suficientes para justificar a sua utilização em argamassas de revestimento e de alvenaria [1,15].

### 2.4.2.3. Ligantes de gesso

O gesso é utilizado como ligante em argamassas, pois é um material fácil de produzir e de aplicar, e endurece rapidamente. O gesso é constituído por sulfato de cálcio, existindo na natureza na forma hidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); quando sujeito a temperaturas na ordem dos 120 a 150 °C, dá-se a formação do gesso hemi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), também designado por bassanite. Este tipo de gesso é denominado como *Plaster of Paris* e apresenta-se sob a forma de pó branco; quando lhe é novamente adicionada água sofre recristalização, formando o gesso hidratado inicial. Enquanto este fenómeno se desenrola, dá-se uma presa muito rápida, que origina uma estrutura de rigidez superior à inicial [2,3,11,17].

Se o gesso for calcinado a temperaturas superiores, acima dos 350 °C, ocorre a desidratação total, formando-se um composto anidro chamado anidrite ( $\text{CaSO}_4$ ). A posterior transformação do gesso por hidratação já não é possível [2,3,17].

Como referido acima, a fácil aplicação, trabalhabilidade e baixo custo de produção faz com que o gesso seja um ligante muito utilizado. No entanto apresenta alguns inconvenientes, como solubilidade em águas e baixa resistência mecânica. Portanto, é mais aplicado em climas secos e principalmente em interiores de edifícios.

### **2.4.3. Adjuvantes e aditivos**

Os adjuvantes e aditivos são utilizados para melhorar as propriedades das argamassas e facilitar a sua aplicação. A alteração pode acontecer no estado de fresco, endurecido ou na transição entre os dois. É designada por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do ligante; quando se utiliza uma percentagem superior, então esta substância é designada por aditivo [8]. Seguidamente serão apresentados alguns dos adjuvantes/aditivos mais utilizados.

#### **2.4.3.1. Hidrófugos e impermeabilizantes**

Os hidrófugos e impermeabilizantes são utilizados com o intuito de impedir ou diminuir a penetração e circulação de água através dos canais da argamassa. Este impedimento ou redução é alcançado por meio da redução da tensão capilar dos poros. A superior impermeabilização da argamassa reduz a capacidade de proliferação de fungos, para além de aumentar a resistência aos ciclos de gelo-degelo, devido à eliminação/diminuição de água nos poros da argamassa. Normalmente, estes tipos de materiais são constituídos por partículas muito finas e insolúveis, que vão obturar os poros e a não são lixiviados pela água. Os mais comuns são cinzas volantes, escórias de alto forno, a que se adicionam agentes repelentes da água – sais metálicos [2,3,8].

#### **2.4.3.2. Plastificantes**

Os plastificantes são introduzidos nas argamassas para ajustar a trabalhabilidade. O seu princípio de funcionamento baseia-se na adsorção de catiões por parte do ligante de forma a alterar a carga da superfície das partículas e, consequentemente, criar repulsão entre si na fase aquosa. Esta repulsão facilita a hidratação das partículas, conseguindo-se obter argamassas com a mesma trabalhabilidade, mas adicionando menos quantidade de água. Os plastificantes também são conhecidos como redutores de água. São constituídos por polímeros de cadeia longa, normalmente ácidos lignossulfonatos e hidrocarboxílicos [2,3,10,19]. Existem, ainda super-plastificantes, que actuam de forma semelhante, mas mais eficaz. Asseguram trabalhabilidade semelhante, com menos % de água [3,19].

Estes adjuvantes/aditivos podem, em alguns casos, originar efeitos adversos, tais como retardar o tempo de presa, reduzir a resistência mecânica em idades iniciais, devido à introdução de bolhas de ar aquando do processo de amassadura [10].

### **2.4.3.3. Aceleradores e retardadores de presa**

Os aceleradores de presa são utilizados para acelerar o processo de hidratação. Diminui drasticamente a trabalhabilidade da argamassa e garantem rápido ganho de resistência mecânica. São utilizados em climas particularmente difíceis – frios e húmidos. Entre os aceleradores de presa mais utilizados estão os sais de alumínio [2,3,10].

Ao contrário, os retardadores de presa são utilizados para atrasar a velocidade de hidratação da argamassa. São utilizados em climas extremamente secos, de forma a manter a trabalhabilidade da argamassa aceitável durante o tempo pretendido. Estes produtos são à base de ácidos hidrocarboxílicos que reduzem a solubilidade dos compostos de hidratação do ligante, retardando, desta forma a presa [2,3,10].

### **2.4.3.4. Promotores de aderência**

Os promotores de aderência apresentam-se sob a forma de resinas, pertencendo à classe dos polímeros sintéticos; entre os mais utilizados encontra-se o acetato de polivinilo, o propionato de vinilo e o ácido acrílico. Quando à temperatura de desidratação, formam uma estrutura rígida que aumenta a aderência da argamassa fresca a qualquer superfície. Os promotores de aderência promovem também um aumento na resistência à tração e flexão devido ao melhoramento da ligação entre os componentes [2,3,8].

### **2.4.3.5. Agentes introdutores de ar**

Os introdutores de ar promovem a formação de microbolhas com diâmetro na ordem dos 0.02-1mm durante a amassadura. A sua estabilidade e durabilidade promovem o corte dos canais transportadores de fluidos, pois originam bolhas fechadas relativamente compressíveis que tendem a cortar a capilaridade, melhorando a capacidade de

impermeabilização e resistência aos ciclos de gelo-degelo. Não se deve confundir estas microbolhas com as que são geradas por uma má amassadura, pois essas estão mal distribuídas pela argamassa e apresentam maiores diâmetros, prejudicando seriamente as propriedades mecânicas da argamassa. Os agentes introdutores de ar tornam as argamassas mais trabalháveis e homogêneas, permitem diminuir a quantidade de água necessária ao processo de amassadura e melhoram a resistência à fissuração (acomodação de tensões por parte das microbolhas). A introdução deste adjuvante nas argamassas traduz uma diminuição do valor do módulo de elasticidade, resistência à tracção e compressão [2,3,8,10].

O princípio de actuação destes agentes baseia-se na criação de uma camada insolúvel de iões à volta das microbolhas, com características hidrófugas, para evitar a sua dissolução e crescimento exagerado. Desta forma a argamassa apresentará bolhas de diâmetro reduzido, estáveis e de formas regulares [8].

### **2.4.3.6. Fungicidas**

Este tipo de adjuvante tem como principal função evitar a proliferação de fungos, musgos e bolores nas argamassas. Os fungicidas actuais são à base de heterociclos azotados, substituindo os tradicionais e nocivos metais pesados, mercúrio e estanho [3].

### **2.4.3.7. Pigmentos**

Os pigmentos são óxidos metálicos inertes com a capacidade de conferir coloração às argamassas. Entre os óxidos mais utilizados encontram-se os óxidos de ferro, crómio, cobalto ou manganês. As quantidades adicionadas à argamassa são, por norma, inferiores a 10% da massa do ligante [3,8].

### **2.4.3.8. Fibras**

As fibras são usadas em argamassas de revestimento e são normalmente de vidro, propileno ou de celulose. Com a introdução de fibras na argamassa promove-se uma

melhoria na resistência à tracção, compressão, ductilidade, para além da resistência ao fendilhamento. Para que se obtenham estas melhorias nas propriedades da argamassa é necessário assegurar uma distribuição homogénea das fibras, de forma a evitar a transformação de microfissuras em macrofissuras. Pode-se incorporar fibras de celulose, acrílicas, polipropileno, entre outras [3,8].

### **2.4.3.9. Agentes expansivos**

Os agentes expansivos são utilizados para contrapor a retracção existente aquando da presa da argamassa, pois vão induzir uma ligeira expansão sem afectar a estabilidade da argamassa, melhorando a homogeneidade dimensional da mesma. Quando em contacto directo com os constituintes das argamassas formam bolhas de gás, promovendo a ligeira expansão da argamassa, entre os mais utilizados encontra-se os pós expansivos de alumínio [2,8].

### **2.4.3.10. Cargas leves**

As cargas leves são utilizadas com o intuito de diminuir a massa volúmica aparente e, entre as mais utilizadas, encontra-se a vermiculite expandida, perlite expandida, poliestireno expandido e grânulos de vidro expandido.

Para além da diminuição da massa volúmica aparente, a incorporação das cargas leves provoca diminuição do módulo de elasticidade, resistência à flexão e compressão. O uso das cargas leves induz um aumento considerável do teor de água a utilizar na amassadura, o que provoca maior retracção da argamassa durante o tempo de cura, diminuição da resistência ao impacto e aos ciclos de gelo-degelo, devido há superior absorção de água [8].

#### 2.4.4. Aditivos/adjuvantes utilizados para controlar a retenção/ libertação de humidade

Como já referido neste trabalho, os adjuvantes seleccionados para controlar a porosidade da argamassa, de forma a melhorar a sua capacidade de regulação de variações de humidade, foram a vermiculite expandida, pós expansivos de alumínio e poliacrilato de sódio.

Os dois primeiros já tinham sido testados com alguma eficácia no trabalho de Gonçalves [8] e o poliacrilato de sódio foi seleccionado devido à sua elevada capacidade de absorção de humidade, visto ser um polímero super absorvente com excelente comportamento, segundo a classificação do projecto NordTest (ver secção 2.6.5.). Seguidamente serão apresentadas as características intrínsecas de cada um.

##### 2.4.4.1. Vermiculite expandida

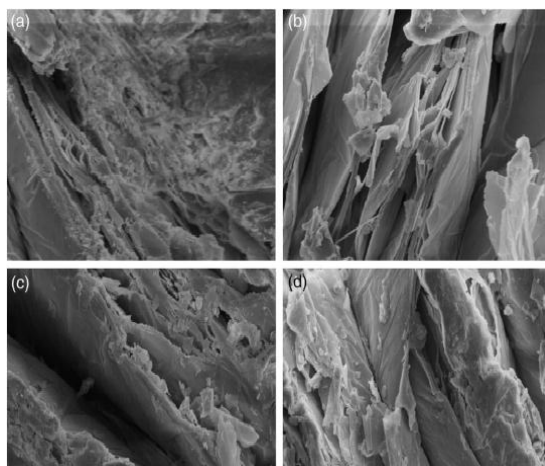
Os primeiros relatos sobre vermiculite aconteceram por volta de 1820, em Massachusetts nos Estados Unidos da América. A designação vermiculite advém do Latim, da palavra *vermiculare*. A vermiculite é um mineral constituído essencialmente por lamelas hidratadas de silicatos de alumínio-magnésio-ferro, apresentando a seguinte fórmula química,  $[(MgFe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$ . Quando a vermiculite é sujeita a fragmentação e depois a um tratamento térmico ( $\sim 1000^\circ C$ ), é designada por vermiculite expandida [17]. Na figura 8a e 8b é possível observar a vermiculite no estado de rocha e o seu aspecto após a fragmentação e respectivo tratamento térmico.



**Figura 8:** a) vermiculite antes da fragmentação e tratamento térmico; b) vermiculite após a fragmentação e tratamento térmico [20,21].



O fenómeno da expansão acontece porque, como foi referido antes a vermiculite apresenta uma estrutura lamelar que aquando do aumento de temperatura abre sob a forma de acordeão. Na figura 9 é possível observar a abertura das lamelas da vermiculite com o aumento da temperatura. Um segundo aspecto importante para a expansão da vermiculite é o facto de entre as lamelas se encontrar água, que com o aumento da temperatura se transforma em vapor ajudando à abertura das lamelas.



**Figura 9:** Imagens de SEM da evolução das lamelas de vermiculite em função da temperatura; a) à temperatura ambiente; b) a 300 °C; c) a 600 °C; d) a 900 °C [22].

Actualmente a vermiculite, é utilizada em vastas áreas, nomeadamente na indústria de refractários, isolamento térmico, construção civil e agricultura. Esta grande diversidade de aplicações da vermiculite deve-se às suas propriedades físico-químicas, pois apresenta estabilidade química (inerte e não tóxica), é um material de baixa densidade (80-120 Kg/m<sup>3</sup>), tem baixa condutividade acústica (redução de ruídos até 62%), baixa condutividade térmica (cerca de 30 a 40% menos que o betão), elevada durabilidade e capacidade de absorção de água (até cerca de 7 vezes o seu peso) [17,23].

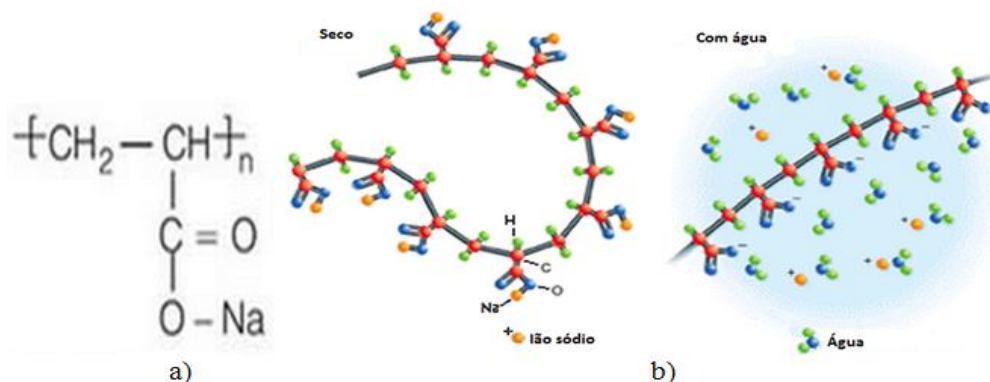
### 2.4.4.2. Pós expansivos de alumínio

O alumínio é o segundo mineral mais utilizado em todo o mundo, sendo superado apenas pelo ferro. Quando é adicionado na forma de pó a argamassas, encontra um meio básico e vai reagir com a cal e libertar hidrogénio. O hidrogénio libertado, fica aprisionado na argamassa, fazendo com que expanda, diminuindo a densidade. Para além desta propriedade, a adição dos pós de alumínio melhora a resistência ao fogo, diminui a

condutividade térmica e aumenta a capacidade de isolamento térmico. A introdução de pó de alumínio em argamassas permite uma reutilização das escórias de alumínio resultantes da fundição do minério e da sua reciclagem [24,25,26,27].

#### 2.4.4.3. Poliacrilato de sódio

O poliacrilato de sódio pertence à classe dos polímeros super absorventes, classificando-se como um agente expansivo. O processo de absorção de água do poliacrilato de sódio é osmótico, ou seja, a água desloca-se dos locais em que a concentração de sódio é menor (zona exterior do polímero) para as zonas de maior concentração de sódio (interior do polímero). Quando o polímero contacta com a água dá-se a libertação dos iões de sódio da cadeia principal, deixando-a carregada negativamente. Esta carga negativa gera repulsão entre as moléculas que provoca o desenrolamento da cadeia e permite a penetração da água (figura 10). Este processo continua até se atingir o estado de equilíbrio na concentração de sódio [28,29].



**Figura 10:** a) estrutura química do poliacrilato de sódio; b) processo de osmose [30].

Segundo Cerolini, D’Orazio, Di Perna e Stazi [31], o poliacrilato de sódio apresenta uma classificação de excelente (classificação NordTest) na capacidade de regular a humidade relativa num ambiente fechado. Como tal, é um material de elevado interesse para o desenvolvimento de uma argamassa de aplicação em interiores com função de regular a humidade relativa.

## 2.5. Transferência de humidade em materiais porosos

Os materiais de construção apresentam normalmente uma estrutura interna porosa interligada. Por isso, quando expostos a variações de humidade relativa adsorvem ou libertam humidade. Podem fixar a humidade mediante três processos físicos: (i) adsorção do vapor de água contido no ar; (ii) capilaridade por contacto com água na fase líquida; (iii) condensação do vapor de água no interior dos materiais, uma vez atingido o ponto de saturação. A quantidade de água acumulada por estes materiais depende de vários factores, nomeadamente da natureza do material constituinte da fase sólida, da forma, dimensão e interligação dos poros, de condições termodinâmicas (pressão e temperatura) e ainda da taxa de ventilação dos edifícios [32,33].

### 2.5.1. Humidade

Os problemas inerentes às variações de humidade relativa no interior de edifícios são actualmente alvo de inúmeros estudos que tendem mitigá-los. Os estudos destes efeitos indesejáveis iniciaram-se há cerca de um século, num debate promovido pela revista *Science*. O tema em avaliação era como evitar valores de humidade relativa superiores a 40% durante o Inverno [34].

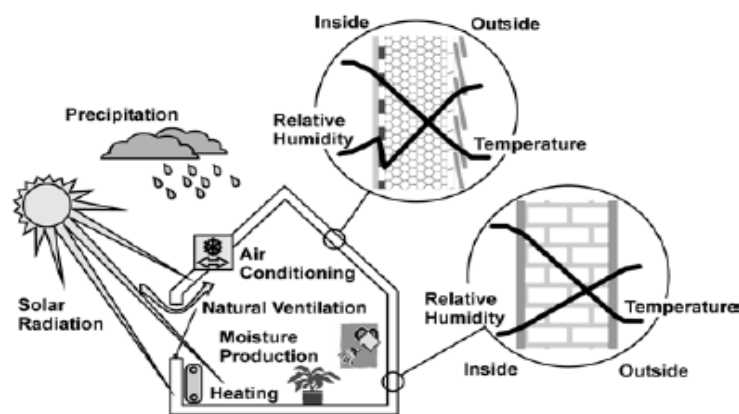
A acumulação de humidade nas estruturas é um problema, pois as pessoas passam cerca de 90% do seu tempo de vida dentro de edifícios, quer seja no trabalho, em casa ou edifícios públicos. Como tal, é importante garantir elevados níveis de conforto dentro dos mesmos, caso contrário podem ocorrer problemas de saúde humana, como alergias, irritações nos olhos e na pele, problemas respiratórios, entre outros. Mas também a durabilidade dos edifícios é posta em causa, pois actualmente os problemas relacionados com a humidade são a principal causa de deterioração dos mesmos. Entre os principais efeitos negativos da humidade (figura 11) destaca-se o aparecimento de bolores, fungos, deterioramento de peças em madeira e descargas electrostáticas [34,36,37,38,39].



**Figura 11:** Aparecimento de bolor devido a humidade [35].

Os efeitos negativos provocados pela humidade nos edifícios fazem-se sentir em locais denominados como microclimas. São zonas onde o clima é diferente do resto da área envolvente. Alguns exemplos de zonas com microclimas em interiores de habitações são as pontes térmicas, paredes mal isoladas (figura 11) e zonas atrás de mobiliário que sofrem deficiente ventilação [36,39]. Nestas zonas existe uma variação significativa no teor de humidade relativa em relação à área envolvente: excesso ou deficiência.

O teor de humidade num edifício é resultado da soma de vários balanços (figura 12), envolvendo o clima exterior, ventilação do edifício, temperatura, a capacidade de controlar a humidade por parte dos materiais, objectos do interior do edifício e existência de fontes de humidade (ocupantes, plantas) [34,39,40,41].



**Figura 12:** Balanço de humidade relativa no interior de um edifício [42].

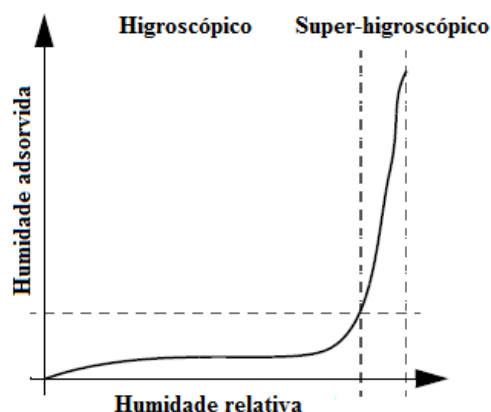
Como referido anteriormente, uma das variáveis com influência directa no valor da humidade relativa no interior de edifícios é a ventilação do mesmo. O interior do edifício é composto por objectos (móveis, livros, etc.) e materiais de construção que apresentam em geral uma estrutura porosa, que ajuda a controlar as variações de humidade. A taxa de ventilação é de extrema importância no suporte à regularização da humidade relativa. Assim sendo, uma boa ventilação promove a remoção do excesso de humidade (evita condensação), diminui a amplitude das variações sazonais ou diárias de humidade relativa, para além de permitir a renovação de ar fresco e eliminar cheiros e microrganismos nocivos [37,39].

Outro factor de elevada importância no valor da humidade relativa no interior de edifícios é a temperatura, uma vez que estas variáveis variam inversamente. Uma diminuição no valor da temperatura traduz o processo inverso. A variação de temperatura ganha mais relevância para valores elevados de humidade relativa, acima dos 70%.

### 2.5.2. Higroscopia dos materiais porosos

Devido à estrutura porosa dos materiais de construção, estes possuem a capacidade de adsorver vapor de água num meio onde haja variação de humidade relativa. Este fenómeno deve-se às forças intermoleculares ou de *Van der Waals*, que actuam na interface sólido-fluido no interior dos poros [32,43].

Os materiais podem então ser classificados como não higroscópicos, quando a sua massa se mantém praticamente constante perante variações de humidade relativa do meio em que estão inseridos. Ou podem ser classificados como higroscópicos e super-higroscópicos (figura 13). Os materiais higroscópicos actuam numa gama de humidade relativa ligeiramente superior a 0% até cerca de 95 a 98%. Ocorre adsorção de moléculas de água e a consequente formação de várias camadas de moléculas no interior dos poros. O fenómeno de transporte mais relevante nos materiais higroscópicos é o transporte de vapor que se sobrepõe ao transporte em fase líquida. Não é, portanto, espectável a ocorrência de condensação. Um material higroscópico atinge a humidade de equilíbrio ou higroscópica após estar em contacto com o meio envolvente durante um período de tempo prolongado, em condições termodinâmicas e de humidade relativa estáveis. Já, nos materiais super-higroscópicos, o transporte em fase líquida é dominante, existindo condensação capilar. Actuam na gama de humidade relativa superior a 95% [8,32,43,44,45].

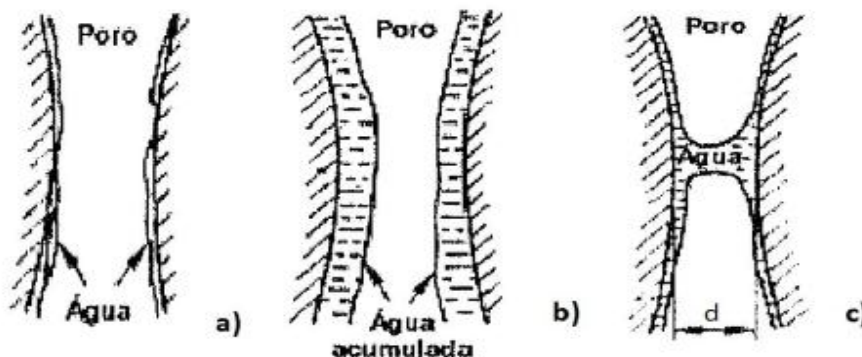


**Figura 13:** Higroscopia de materiais porosos mediante a humidade relativa do meio [44].

Materiais contendo maior volume de poros e de menor tamanho médio apresentam maior higroscopicidade, uma vez que a higroscopicidade de um material é avaliada considerando não só a capacidade de adsorver como de desadsorver as moléculas de água.

### 2.5.3. Adsorção e desadsorção de humidade

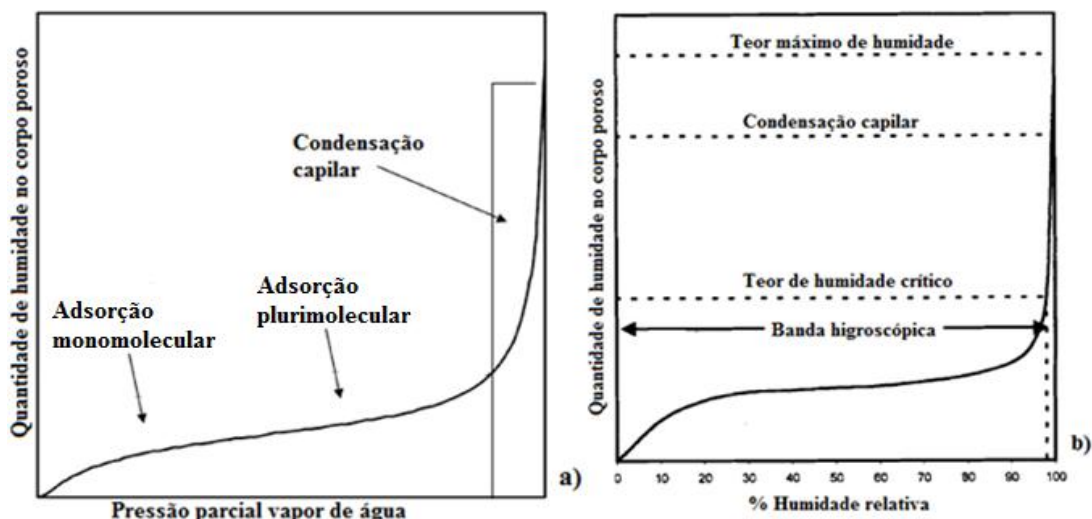
Os materiais de construção possuem tendência para adsorver moléculas de água na sua estrutura. Este processo de adsorção das moléculas de água em materiais porosos ocorre em três etapas distintas: (i) adsorção monomolecular; (ii) adsorção plurimolecular; (iii) condensação capilar. Para pressões parciais mais baixas, ocorre uma primeira fixação de moléculas de água, formando uma primeira camada de moléculas sobre a superfície porosa (figura 14a). À medida que a pressão parcial de vapor de água aumenta, há justaposição de diferentes de camadas de moléculas de água (figura 14b). Quando a pressão parcial do vapor se aproxima da pressão de saturação e caso o diâmetro dos poros seja diminuto ( $2E^{-9}$  a  $20E^{-9}$  m) inicia-se a formação de gotículas (figura 14c). Estas gotículas são o resultado da conexão de camadas plurimoleculares de água [32,43,46].



**Figura 14:** Etapas de fixação de humidade do interior dos poros; a) adsorção monomolecular, b) adsorção plurimolecular, c) condensação capilar [8].

Analisando a figura 15a, a região entre o ponto inicial até à zona em que se inicia o fenómeno de condensação, refere-se à zona higroscópica do material acima discutida. Ainda através da figura 15a, é possível verificar qual o máximo de humidade que um material pode reter a uma determinada pressão de vapor e a temperatura constante. Esta curva é denominada de adsorção isotérmica. Uma outra forma de representar a curva de adsorção isotérmica é apresentada na figura 15b, onde a quantidade de humidade no corpo

poroso é representado em função da humidade relativa (%) [46,47]. Pela análise desta figura, é possível observar a banda de higroscopicidade do material, que pode variar entre o zero absoluto, caso o material esteja num ambiente de humidade relativa nula, até ao teor crítico de humidade, que corresponde ao valor de humidade que um material apresenta quando em contacto com um ambiente saturado (humidade relativa > 95%) durante longos períodos de tempo. O teor máximo de humidade é atingido quando todos os espaços vazios do material poroso são preenchidos por humidade, ou seja, o teor volúmico de humidade é igual à porosidade aberta. No entanto, na prática, dificilmente o teor máximo de humidade é alcançado, visto existir ar no interior do material. Assim, é necessário definir o teor de humidade de condensação capilar, que consiste na prática à quantidade de humidade que um material contém quando em contacto com ambientes de elevados valores de humidade relativa [32,43,47,48].



**Figura 15:** Curvas de adsorção isotérmica, a temperatura constante; a) em função da pressão parcial vapor de água, b) em função da humidade relativa [46,47].

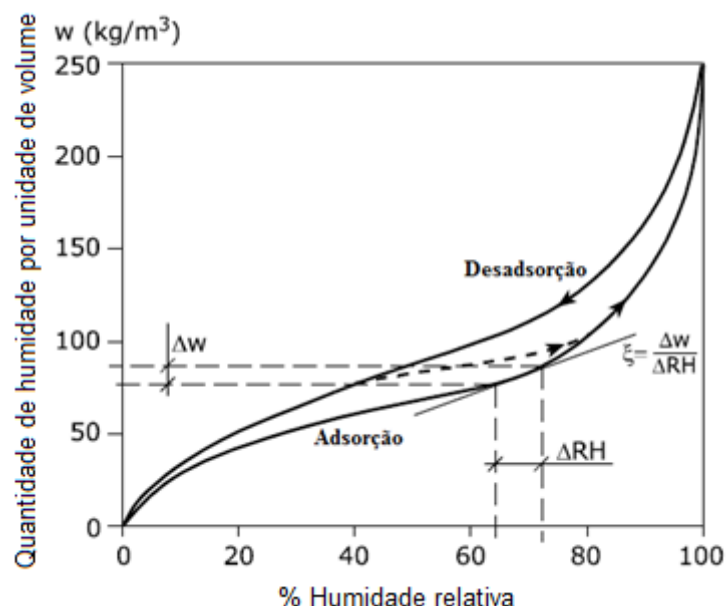
Considerando o processo inverso ao descrito acima, ou seja, que se parte de um corpo poroso saturado com humidade que depois é colocado numa atmosfera parcialmente saturada com vapor de água, verifica-se que o corpo poroso começa a libertar moléculas de água para o ambiente parcialmente saturado. Este fenómeno é designado como desadsorção e ocorre em duas fases distintas: (i) na primeira dá-se o transporte das moléculas de água dos poros de maior dimensão para a superfície por acção capilar, sendo depois evaporada para o meio envolvente; (ii) a segunda etapa corresponde à remoção das moléculas de água dos poros de menor dimensão, por difusão superficial em fase de vapor.



Este processo de libertação de moléculas de água dura até que seja atingido o equilíbrio entre o material poroso e a atmosfera envolvente [8,46].

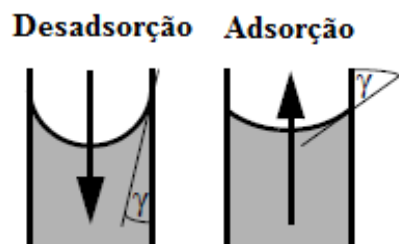
## 2.5.4. Histerese

O comportamento dos materiais porosos higroscópicos caracteriza-se por um fenómeno designado por histerese (figura 16) comum à grande maioria destes materiais. A curva de desadsorção (secagem) é superior à de adsorção (humidificação). Normalmente, usa-se unicamente a curva de adsorção para caracterizar a capacidade de retenção de humidade por parte do material, mediante a determinação do declive ( $\xi$ ) na região de humidade relativa de interesse [8,37].



**Figura 16:** Histerese das curvas de adsorção e desadsorção [34].

Não existe ainda uma teoria sólida que explique cabalmente este fenómeno de histerese. No entanto, foram já avançadas algumas hipóteses. Uma delas é conhecida por frasco de tinta, que indica que, na fase de adsorção, a velocidade é ditada pelos poros de maior raio, sendo a desadsorção controlada pelos poros de menor raio. Por isso ocorre a velocidade inferior. Outra hipótese avançada para explicar o efeito da histerese baseia-se na diferença entre os ângulos de contacto da água



**Figura 17:** Efeito do ângulo de contacto na histerese [44].



com os poros na fase de condensação capilar (figura 17). Aquando da adsorção o menisco da gota avança, recuando na fase de desadsorção. Portanto, na desadsorção, o ângulo de contacto da superfície do poro com o menisco é inferior, uma vez que a superfície dos poros já se encontra humidificada pelo vapor de água, o que dificulta a saída de água na fase de condensação capilar [32,44,49].

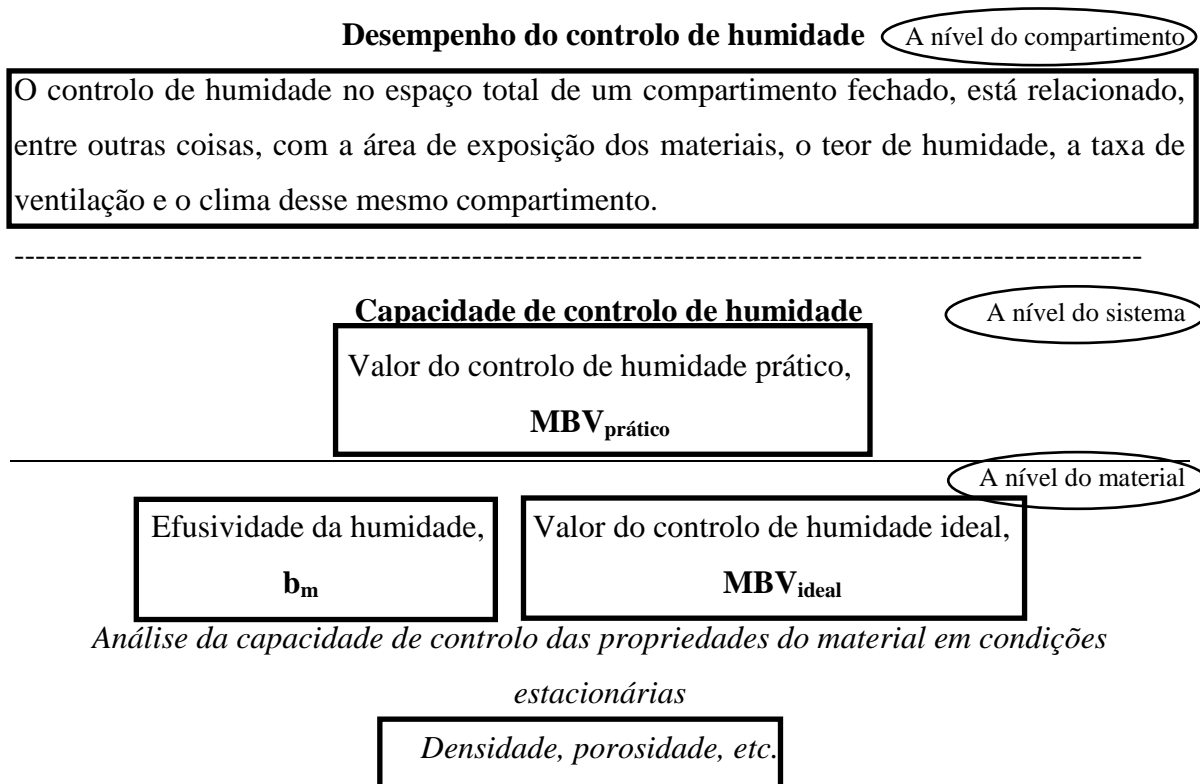
### **2.6. Avaliação da capacidade de controlo de humidade em materiais de construção**

A utilização de materiais de construção como elementos de regulação dos picos de humidade, diários ou sazonais, em edifícios começou a ser estudada há já algum tempo, como referido. No entanto, não existia uma forma de caracterização uniforme do comportamento dos materiais. Em 2002, no Japão, foi criado um teste uniforme para classificar os materiais de construção quanto à sua capacidade de adsorção/ desadsorção para regular a humidade interior (*JIS A 1470- 1*). Posteriormente, em 2003 na Dinamarca, durante um seminário promovido pela Universidade Técnica da Dinamarca, foi proposto o método NordTest. Este teste consiste em medir a quantidade de água que é transportada para o interior ou exterior da superfície do material, durante um período de tempo, quando este é sujeito a variações de humidade relativa no meio envolvente  $[(\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR}))]$ . As diferenças entre estes dois métodos residem no tempo de exposição da amostra às variações de humidade, na espessura da amostra e na forma de interpretar os dados. O método NordTest é o que tem sido adoptado pela grande maioria dos investigadores da área. Comumente a sigla utilizada para a classificação dos materiais pelo método NordTest é MBV (*Moisture Buffer Value*) [8,31,39,50,51,52,53].

Ambos os testes são isotérmicos, sendo os materiais colocados em câmaras climáticas que proporcionam variações cíclicas de humidade relativa, medindo-se a variação da massa da amostra [52]. Para este trabalho foi adoptado o método NordTest, onde as amostras são sujeitas a variações cíclicas diárias de humidade relativa, 75% durante o período de 8 horas e 33% durante 16 horas, de forma a simular o tempo que um indivíduo passa dentro de um compartimento fechado, seja o escritório, quarto ou sala de aulas [8,31,50-57].

### 2.6.1. Diferentes níveis do controlo de humidade

A capacidade dos materiais porosos para controlar a humidade interior de um edifício pode ser descrita a três níveis diferentes: a nível do compartimento, do sistema e do material, como apresentado na figura 18 [51].



**Figura 18:** Ilustração descritiva dos três níveis de controlo de humidade num compartimento fechado [8,51].

A nível do compartimento é tida em conta a influência dos materiais de construção, dos elementos decorativos, do mobiliário, bem como a taxa de ventilação, do clima no interior do compartimento e das fontes de humidade. A nível do sistema, a análise da capacidade de controlo de humidade tem em conta as trocas de humidade entre o material em estudo e o meio envolvente, que por sua vez depende da área e espessura do material e da taxa de ventilação. Por fim, a nível do material, a avaliação da sua capacidade é feita desprezando o clima em que o material está inserido [8,51,53,55].

O desempenho de um material no controlo de humidade pode ser determinado por métodos teóricos, recorrendo às propriedades intrínsecas dos materiais em condições estacionárias para calcular o  $MBV_{ideal}$  ou a efusividade ( $b_m$ ). Ou então, recorrendo a métodos práticos, para se obter o  $MBV_{prático}$  (ver secção 2.6.4.).

## 2.6.2. Efusividade da humidade

A efusividade da humidade [ $Kg/m^2.Pa.s^{1/2}$ ] constitui uma forma teórica de expressar a quantidade de humidade adsorvida por um material quando sujeito a um aumento de humidade na sua superfície. A expressão teórica para o cálculo da efusividade ( $b_m$ ) é apresentada na equação 1.

$$b_m = \sqrt{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} / p_s} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,  $\delta_p$  [ $Kg/m.s.Pa$ ] é a permeabilidade ao vapor de água,  $\rho_0$  [ $Kg/m^3$ ] corresponde à densidade do material em seco,  $u$  [ $Kg/Kg$ ] é o teor de humidade,  $\varphi$  [adimensional] é a humidade relativa do meio e por fim  $p_s$  [ $Pa$ ] é a pressão de vapor de saturação. Exceptuando a pressão de vapor de saturação, todos os restantes elementos desta equação são propriedades inerentes ao material e independentes das condições de ensaio [8,51,53].

## 2.6.3. MBV ideal

A determinação do MBV ideal [ $Kg/(m^2.\%HR)$ ] (equação 2) proposta pelo método NordTest, consiste numa avaliação da quantidade de água adsorvida ou libertada por um material poroso, quando sujeito a variações de humidade relativa [51,53,55].

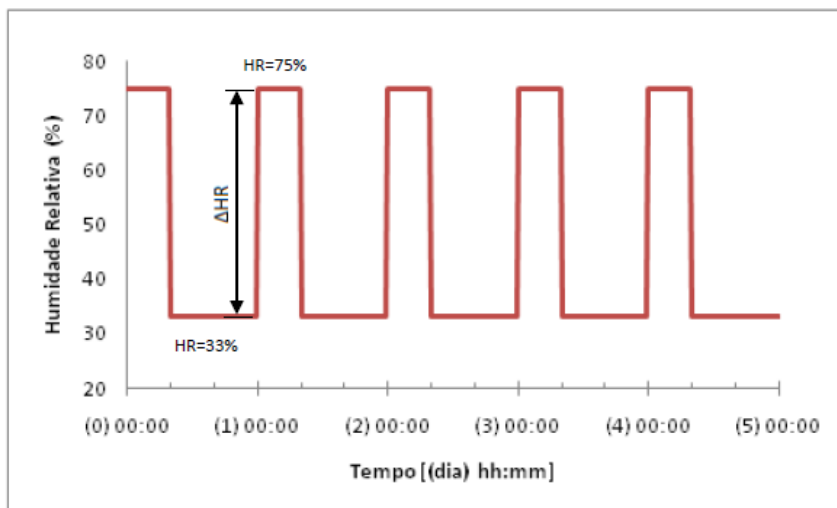
$$MBV_{ideal} \approx 0.0060 p_s \cdot b_m \sqrt{t_p} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,  $t_p$  corresponde ao período [s] em que ocorre a libertação/adsorção de humidade. O cálculo do MBV ideal é essencialmente utilizado para a caracterização do

material (figura 18). Como se verifica pela equação 2, o MBV ideal é directamente dependente da efusividade da humidade, que por sua vez é determinada em condições estáveis (pressão de vapor de saturação, taxa de ventilação e temperatura). Como tal, o MBV ideal é uma aproximação dos valores obtidos no MBV prático, pois é difícil obter as condições de estabilidade exigidas para o cálculo da efusividade da humidade [8,51,53,55].

### 2.6.4. MBV prático

O MBV prático é indicativo da quantidade de água que é transportada para dentro ou para fora do material por unidade de área, durante um certo período de tempo, quando sujeito a variações cíclicas de humidade relativa do meio envolvente. As unidades do MBV prático são  $[Kg/(m^2.\%HR)]$ . O período de variação da humidade relativa corresponde normalmente a 24 horas, em que o material está 8 horas a uma humidade relativa de 75% e 16 horas a 33% repetido pelo menos por três ciclos. A variação de massa entre cada ciclo, de acordo com o projecto NordTest, tem que ser inferior a 5%. A amplitude de variação de humidade relativa durante este período de tempo é de 42%, como se pode observar pela figura 19 [51,55].



**Figura 19:** Ciclo experimental para o cálculo de MBV prático [8].

O valor do MBV prático depende da existência de camadas, ou seja, oscila em materiais que apresentam revestimento superficial. Depende também da espessura da amostra e do coeficiente de transferência de massa à superfície [8].

### 2.6.5. Classificação dos materiais pelo método NordTest

Na tabela 1 são apresentados os intervalos de valores obtidos pela determinação do MBV prático, que classificam os materiais. A tabela 2 apresenta os valores do MBV práticos de materiais comuns, obtidos durante o projecto NordTest. Estes valores servirão de base de comparação dos resultados obtidos das várias formulações de argamassas, bem como na aferição do método utilizado para a determinação do MBV prático neste trabalho.

**Tabela 1:** Intervalos de classificação do MBV prático [51].

Classe do MBV prático	MBV mínimo	MBV máximo
	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR}) @ 8/16\text{h}$	
Insignificante	0	0,2
Limitado	0,2	0,5
Moderado	0,5	1
Bom	1	2
Excelente	2	...

**Tabela 2:** Valores do MBV prático de vários materiais [51].

Material	MBV $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})]$
Contraplacado	1,16
Betão	0,38
Gesso	0,64
Madeira revestida com verniz	0,46
Betão celular	1,04
Tijolos	0,47

### 3. Procedimento experimental

O procedimento experimental deste trabalho divide-se em duas etapas: (i) preparação das diversas composições; (ii) caracterização das propriedades das amostras.

#### 3.1. Argamassa padrão e novas formulações

A argamassa padrão utilizada foi fornecida pela empresa ‘*Saint-Gobain Weber Portugal, Argamassas Industriais, S.A.*’. Classificada como uma argamassa bastarda, a tabela 3 mostra a sua composição.

**Tabela 3:** Composição da argamassa padrão [8].

Materiais constituintes	Argamassa Padrão
Cal aérea hidratada	8%
Cimento (Tipo I)	8%
Areias (amarela e do rio, na proporção 1:1)	Acerto
Hidrófugo de massa	0,10%
Introdutor de ar	0,025%
Retentor de água e plastificante (éter de celulose)	0,08%
Fibras	0,1%
Cargas leves	1%
<b>Características em pó ou pasta</b>	
Traços ponderais (ci:cal:areia)	1:1:5
Teor de partículas finas	30%

A esta argamassa padrão adicionaram-se diversos adjuvantes, originando as formulações, apresentadas na tabela 4. As formulações B e C apresentam ligeiras variações das já realizadas por Gonçalves [8], exceptuando as amostras B1 e C1 que são iguais. A amostra D corresponde a uma combinação dos dois adjuvantes que melhores resultados apresentaram no referido trabalho. Relativamente às amostras E, como na literatura não

existia qualquer referência ao teor a adicionar, dado o pioneirismo nesta aplicação, considerou-se a quantidade de adjuvante disponível e a trabalhabilidade da argamassa.

**Tabela 4:** Composições das várias formulações.

Nomenclatura	Composição
A	Padrão
B1	Padrão + 5% vermiculite expandida
B2	Padrão + 7% vermiculite expandida
C1	Padrão + 0,1% agente expansivo
C2	Padrão + 0,15% agente expansivo
C3	Padrão + 0,2% agente expansivo
D	Padrão + 5% vermiculite expandida + 0,1% agente expansivo
E1	Padrão + 0,5% poliacrilato de sódio
E2	Padrão + 1% poliacrilato de sódio
E3	Padrão + 2% poliacrilato de sódio

### 3.2. Preparação do amassado

A primeira etapa na preparação do amassado é determinar a % de água adequada de forma a que a argamassa apresente a trabalhabilidade desejada. Pesam-se 100g de produto, adicionando gradualmente água até se obter a trabalhabilidade desejada, aferida manualmente por um técnico especializado, mas controlável por testes na mesa de espalhamento.

Após a determinação da % de água, esta é colocada num recipiente apropriado para 2 Kg de produto em pó. Seguidamente, com recurso a uma espátula, procede-se à homogeneização manual, de forma a evitar perdas de material na fase seguinte. Esta fase corresponde a homogeneização automática durante 15 segundos, no aparelho da marca Controls, modelo 65 – L0005 (figura 20). Depois procede-se a mais uma homogeneização manual, durante um minuto e, por fim, a mais uma homogeneização automática durante 75 segundos. No final, deve-se obter um produto com baixa pegajosidade, que não seja fluído mas facilmente alisável.



**Figura 20:** Equipamento utilizado no processo de amassadura.

Posteriormente, e sem tempo de repouso, realizam-se os testes em fresco e fez-se a moldagem dos provetes que são colocados num espaço com temperatura e humidade relativa controlada, 23 °C e 50% respectivamente.

### **3.3. Caracterização das argamassas**

As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e após endurecimento. A tabela 5, lista os ensaios efectuados.



**Tabela 5:** Ensaio efectuados às várias formulações.

Estado do produto	Ensaio	Tempo de cura	Normas
Produto em pasta	% de água	-	-
	Densidade	-	NP EN 1015-10
	% de ar incluído	-	ASTM C231-49 T
Produto endurecido	Variações de massa	1d, 7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) – A3.3
	Variações dimensionais	1d, 7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) – A3.3
	Densidade	1d, 7d, 28d	NP EN 1015-10
	Módulo de elasticidade	7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) UNE 83-308-86
	Resistência à flexão	28d	NP EN 1015-11
	Resistência à compressão	28d	NP EN 1015-11
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade	28d	NP EN 1015-18
	Coefficiente de resistência à difusão de vapor	28d	NP EN 1015-19 DIN 52615
	Porosimetria de mercúrio	28d	-
	Saturação/libertação	28d	-
	Ensaio de controlo de humidade (MBV)	28d	-
	Condutividade térmica	28d	-

### 3.3.1. Caracterização no estado fresco

#### Percentagem de água

Consiste em adicionar água de forma gradual a 100g do produto em pó até se atingir a trabalhabilidade desejada.

## Densidade

A densidade é calculada com recurso a um copo de volume e peso conhecido. A densidade é expressa em  $[g/cm^3]$  e determinada pela seguinte equação:

$$\text{Densidade} = \frac{m_1 - m_0}{V_c} \quad (\text{Equação 3})$$

onde  $m_1$  e  $m_0$  corresponde à massa do copo cheio de argamassa e vazio respectivamente e  $V_c$  é o volume do copo.

## Percentagem de ar incluído

A percentagem de ar incluído é determinada com recurso ao aparelho da marca Controls, modelo C171, apresentado na figura 21. O amassado é colocado no interior do aparelho, posteriormente através de uma das suas torneiras laterais é introduzida água de forma a remover o ar existente. São fechadas as torneiras laterais para não permitir a entrada de ar no sistema e é bombeado ar, para o amassado. Esta quantidade de ar introduzida é lida no manómetro do aparelho e corresponde à percentagem de ar incluído.



**Figura 21:** Equipamento utilizado para a medição da percentagem de ar incluído.

### 3.3.2. Caracterização da argamassa endurecida

Para a realização dos diversos ensaios ao produto endurecido produziram-se provetes de três dimensões distintas, nomeadamente: três provetes prismáticos com dimensões 40x40x160 mm, utilizados para a determinação da variação de massa, variação dimensional, densidade, resistência à flexão e à compressão e coeficiente de absorção de água por capilaridade. Dois provetes prismáticos com dimensões de 25x25x285 mm, para determinar o módulo de elasticidade e a porosidade. Um provete de dimensões 275x275x18 mm para a determinação da condutividade térmica e três provetes em forma de bolacha circular, com dimensões 120 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, utilizados nos testes de saturação/libertação de vapor de água, coeficiente de resistência à difusão de vapor e de controlo de humidade (figura 22).



**Figura 22:** Provetes produzidos para a realização dos diversos ensaios.

#### Variação da massa

A variação da massa é determinada através de equação 4 e expressa em forma de percentagem. O registo das alterações mássicas dos provetes é feito em três momentos distintos: 1 dia, 7 dias e 28 dias de cura.

$$\text{Variação massa} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde  $m_i$  corresponde à massa após 1 dia de cura e  $m_f$  à massa final. A variação mássica é expressa em [%].

## Variação dimensional

As variações dimensionais das amostras são registadas ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura, recorrendo a um micrómetro, da marca Mitutoyo, modelo ID C112B (figura 23). A variação dimensional é determinada pela equação:

$$\text{Variação dimensional} = \frac{l_f - l_i}{0,16} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que  $l_i$  corresponde à dimensão do provete ao fim de um dia de cura [mm] e  $l_f$  à dimensão do provete ao fim de 7 ou 28 dias de cura [mm], 0,16 corresponde à dimensão inicial do provete [m]. Esta variação é expressa em [mm/m].



**Figura 23:** Micrómetro utilizado para medir as variações dimensionais.

## Densidade aparente

A densidade é determinada ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura e calculada pela expressão:

$$\text{Densidade} = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde  $m$  é a massa do provete e  $v$  o seu volume. A densidade é expressa em  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ .

## Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade é necessário registrar a massa dos provetes ao fim de 1, 7 e 28 dias, e determinar a frequência de ressonância, utilizando o equipamento LDS PA25E Power Amplifier, representado na figura 24. O provete é fixo ao aparelho, induzindo-lhe impulsos mecânicos que vão gerar uma frequência característica. A equação seguinte traduz o cálculo do módulo de elasticidade:

$$E = \frac{4.F^2.L.m}{g.V} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde, E corresponde ao módulo de elasticidade, F à frequência de ressonância, m é a massa do provete, g a aceleração gravítica e V o volume do provete.



**Figura 24:** Equipamento utilizado para medir a frequência de ressonância das amostras.

## Resistência à flexão

A resistência à flexão é determinada com recurso ao equipamento da marca Controls, modelo 65 – L1860, apresentado na figura 25. O ensaio de resistência à flexão é realizado com um aumento de carga uniforme a uma velocidade de 115 KPa/s. O valor de ruptura é determinado pela equação 8.

$$R_f = \frac{1,5.F_f.l}{b.d^2} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde  $R_f$  corresponde à resistência à flexão [MPa],  $F_f$  é a carga máxima suportada pelo provete [N],  $l$  é distância entre apoios [mm] e  $b$  e  $d$  corresponde às dimensões das arestas do topo do provete [mm].



**Figura 25:** Equipamento de ensaios de resistência à flexão e compressão.

### Resistência à compressão

Para o cálculo da resistência à compressão foi utilizado o mesmo equipamento, com aumento uniforme de carga à velocidade de 245 KPa/s. Utiliza-se uma das metades resultantes dos ensaios à flexão. A resistência à compressão é determinada pela equação 9.

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{Equação 9})$$

$R_c$  corresponde à resistência à compressão [MPa],  $F_c$  é a carga máxima suportada pelo provete [N] e  $A$  corresponde à área da superfície sobre a qual é aplicada a carga [mm<sup>2</sup>].

### Coefficiente de absorção de água por capilaridade

Para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade são utilizados meios prismas resultantes dos ensaios de flexão. Os meios prismas são pesados, seguidamente colocados num recipiente com uma esponja humidificada, sendo pesados novamente ao fim de 10 e 90 minutos. Este ensaio decorre dentro de um recipiente isolado,

que tem no seu interior uma solução saturada de sulfato de zinco (figura 26), de forma a assegurar uma humidade relativa de 95%, à temperatura de 23 °C.



**Figura 26:** Aparato para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

O valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade obtém-se directamente pela diferença de massa entre os 90 e 10 minutos (equação 10).

$$C = m(90') - (m10') \quad (\text{Equação 10})$$

C é o coeficiente de absorção de água por capilaridade [ $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ],  $m(90')$  e  $m(10')$  é a massa do provete ao fim de 90 e 10 minutos respectivamente [g].

### **Coeficiente de resistência à difusão de vapor de água**

Para a determinação deste parâmetro é utilizado um provete em forma de bolacha que é colocada sobre uma tina que contém uma solução saturada de nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ) de forma a manter a humidade relativa na ordem dos 92%. Este conjunto é selado com parafina, de modo a ficar estanque (figura 27). São medidos os valores da variação de massa do conjunto, humidade relativa, temperatura e hora.



**Figura 27:** Aparato do conjunto durante a etapa de pesagem.

Para a determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor de água segue-se a norma NP EN 1015 – 19.

### Porosidade

A avaliação dos tamanhos de poros e do seu volume relativo é determinada pela técnica de intrusão de mercúrio. Como o mercúrio é um líquido de elevada tensão superficial, em contacto com materiais sólidos forma um ângulo superior a  $90^\circ$ , ou seja, não molha as partículas sólidas. Nos materiais porosos a intrusão de mercúrio é assegurada pela aplicação de uma pressão exterior superior à tensão superficial do mercúrio. Existe uma relação directa entre a pressão aplicada e a diminuição do tamanho de poro, ou seja, quanto mais pequeno for o poro maior será a pressão necessária. É com esta relação que é construído o gráfico porosimétrico, do qual se extrai informação acerca da distribuição de tamanhos dos poros.

### Saturação/libertação de água

Para determinar o comportamento das várias formulações em relação aos processos de saturação e libertação de humidade é utilizado um provete em forma de bolacha, revestida lateralmente e num dos topos com parafina. As amostras são colocadas num recipiente igual ao descrito no **coeficiente de absorção de água por capilaridade**,

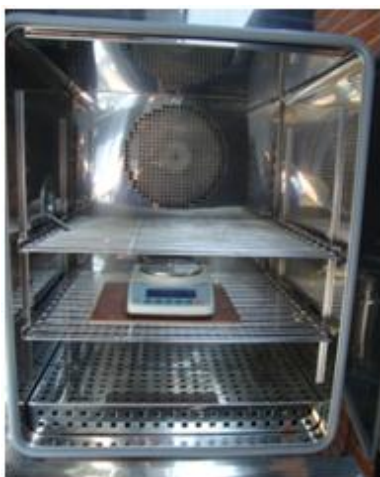


registando-se a variação de massa ao longo do tempo. Este teste decorre até se atingir um valor estável.

A libertação de humidade é aferida ao ar livre (temperatura  $\approx 22^{\circ}\text{C}$  e humidade relativa  $\approx 50 - 60\%$ ), medindo-se a perda de massa até se alcançar o equilíbrio.

### Controlo de humidade ( $\text{MBV}_{\text{prático}}$ )

Para determinar o  $\text{MBV}_{\text{prático}}$  [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ] é utilizado um provete em forma de bolacha, revestido com parafina numa das superfícies e lateralmente de forma a que as trocas de humidade entre o ar e o material ocorram apenas pela superfície não isolada. A amostra é colocada dentro da câmara climática (da marca Aralab, modelo Fitoclima 300 EDTU) sobre uma balança de precisão que mede a variação de massa ao longo do tempo perante uma variação de humidade no interior da câmara (figura 28a). As amostras são sujeitas a variações de humidade relativa de 33% durante 16 horas e 75% durante 8 horas, num total de 5 dias a uma temperatura constante de  $23^{\circ}\text{C}$ . Estes dados são transmitidos e guardados num computador auxiliar (figura 28b). Na figura 29, é apresentado um esquema global de todo o processo.

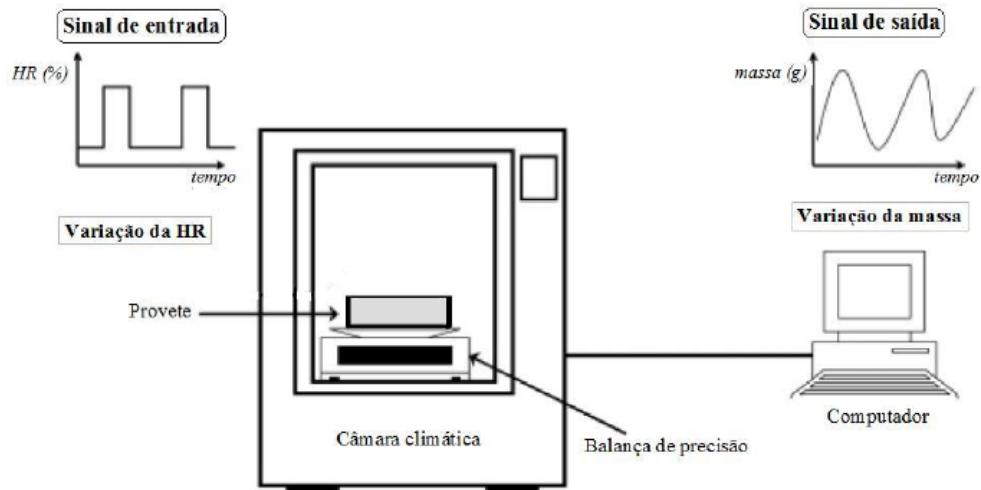


a)



b)

**Figura 28:** a) vista do interior da câmara; b) vista do exterior da câmara.



**Figura 29:** Vista geral do ensaio para a determinação do MBV prático [8].

A equação 11 mostra como determinar o valor de MBV prático das diversas amostras, após terem sido sujeitas ao ensaio acima descrito.

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta \%HR} \quad (\text{Equação 11})$$

$\Delta m$  corresponde à variação de massa,  $A$  à área de exposição e  $\Delta \%HR$  corresponde à variação de humidade relativa, igual a 42%.

## Condutividade térmica

Para a determinação da condutividade térmica são utilizados provetes de dimensão 275x275x18 mm e usa-se o aparelho da marca Deltalab, modelo ET-100 (figura 30). O provete é colocado sobre uma superfície horizontal que o vai aquecer uniformemente. O cálculo da condutividade térmica é feito pela expressão:

$$\lambda = \frac{P \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que  $\lambda$  é a condutividade térmica [W/m°C],  $P$  é a potência necessária para aquecer a amostra [W],  $\Delta x$  é a espessura da amostra [m],  $A$  corresponde à área da amostra [m<sup>2</sup>] e  $\Delta T$

é a diferença de temperatura entre as duas superfícies da amostra [°C]. Os valores da potência e da variação de temperatura são registados pelo aparelho.



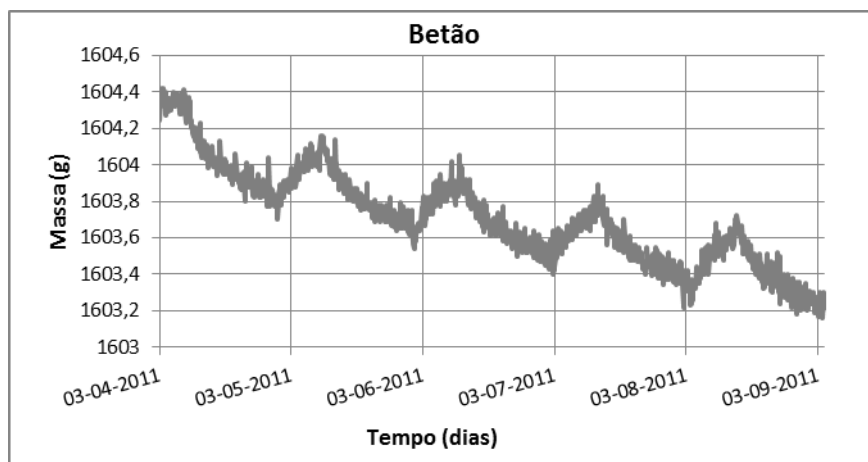
**Figura 30:** Aparelho utilizado para determinar a condutividade térmica.

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

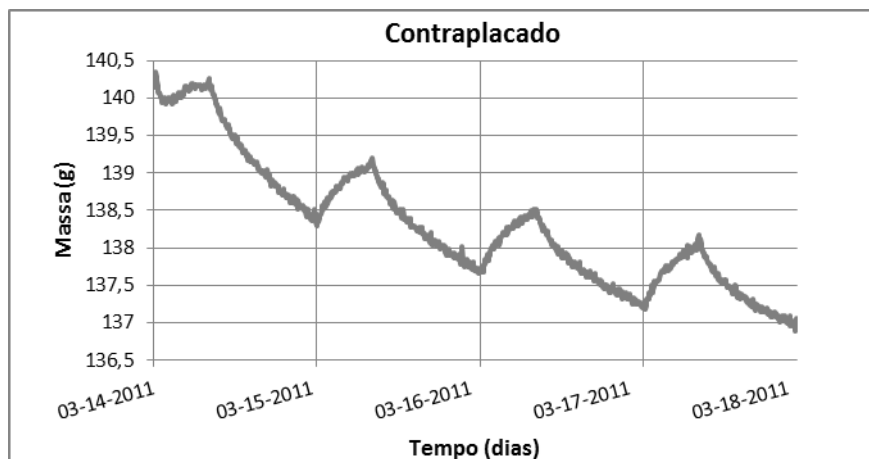
Esta secção do presente trabalho está dividida em três partes: (i) apresentação e discussão dos resultados obtidos para aferição do método de determinação do MBV prático; (ii) apresentação e discussão das propriedades das argamassas no estado fresco; (iii) apresentação e discussão das características do produto endurecido, com especial destaque para os valores do MBV prático.

### 4.1. Aferição do método de determinação do MBV prático

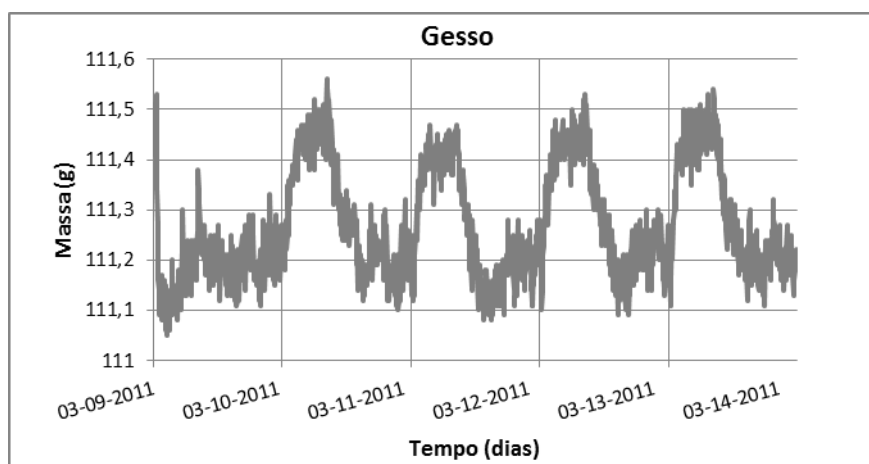
As figuras 31 a 33 mostram a variação de massa dos materiais comuns seleccionados (betão, contraplacado e gesso cartonado) perante variações cíclicas de humidade ambiente, com o objectivo de aferir o rigor dos resultados obtidos em [8] para a determinação do MBV prático. A amostra de contraplacado apresenta um ciclo a menos que as restantes devido a falha de energia.



**Figura 31:** Variação temporal da massa de uma amostra de betão perante variações cíclicas de humidade (MBV prático = 1,13).



**Figura 32:** Variação temporal da massa de uma amostra de contraplacado perante variações cíclicas de umidade (MBV prático = 2,08).



**Figura 33:** Variação temporal da massa de uma amostra de gesso cartonado perante variações cíclicas de umidade (MBV prático = 0,76).

Observando as referidas figuras constata-se que o betão e o contraplacado apresentam facilidade no processo de libertação de água, enquanto o gesso cartonado apresenta um comportamento praticamente uniforme ao longo do tempo de ensaio.

O MBV prático determinado neste trabalho para o betão, contraplacado e gesso cartonado foi de 1,13, 2,08 e 0,76 respectivamente. Comparando estes valores com os apresentados na tabela 6, nota-se que o betão e o contraplacado apresentam valores muito superiores. Por sua vez, o gesso apresenta um valor ligeiramente superior.

Em todos os casos, foi excluído o primeiro ciclo de cada teste para a aferição do MBV, uma vez que não traduzia ainda condições de equilíbrio.

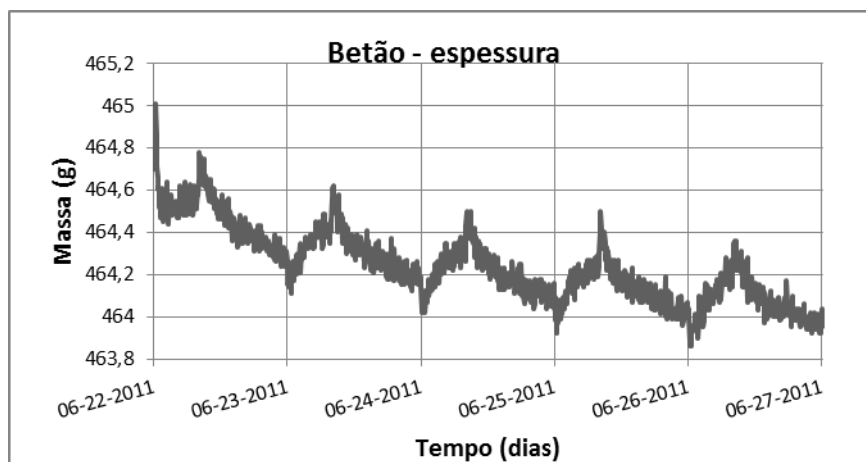
No caso da amostra de contraplacado é de esperar diferenças de composição assinaláveis relativamente às indicadas no NordTest, porquanto engloba materiais naturais (aparas de madeira) de comportamento previsivelmente distinto perante variações de humidade e temperatura.

**Tabela 6:** Valores do MBV prático do projecto NordTest e do presente trabalho.

Material	NordTest	Presente trabalho
Betão	0,38 (limitado)	1,13 (bom)
Contraplacado	1,16 (bom)	2,08 (excelente)
Gesso	0,64 (moderado)	0,76 (moderado)

A heterogeneidade do betão e do contraplacado poderá ajudar a justificar discrepância dos valores de MBV prático. O gesso como é um material homogénio, não apresentará variações significativas na sua estrutura, independentemente do local onde foi produzido. Daí ser uma possível explicação para este material apresentar um MBV prático próximo do referido no NordTest.

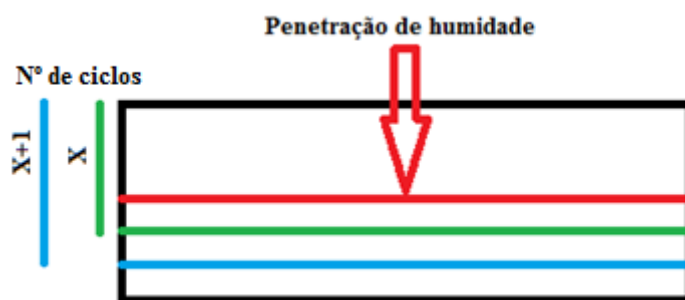
A temperatura, ventilação, acabamento superficial da amostra, espessura e natureza do material pode afectar a avaliação dos valores de MBV prático. Por exemplo, a amostra de betão usada possuía espessura (40mm), ou seja, superior à recomendada (25mm). A figura 34 mostra o gráfico de uma amostra de betão com espessura de 25mm, mantendo-se inalteráveis as restantes variáveis.



**Figura 34:** Variação temporal da massa de uma amostra de betão com espessura igual a 25mm perante variações cíclicas de humidade (MBV prático = 1).

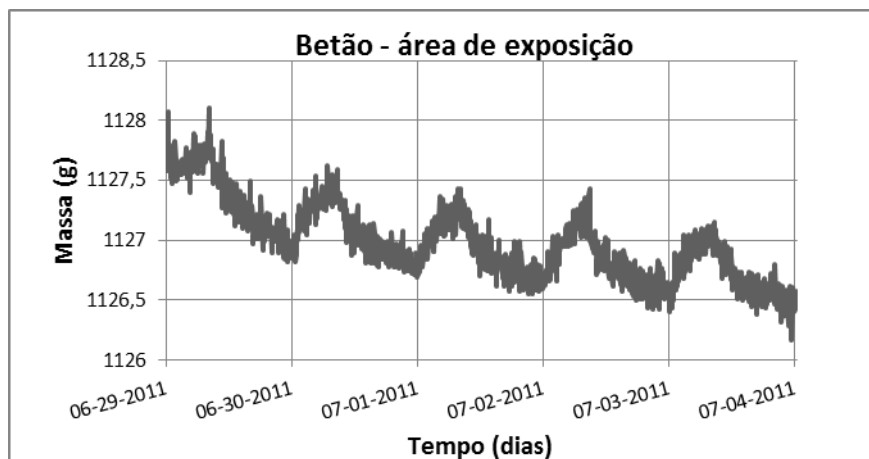
O valor de MBV determinado para esta amostra de betão, com espessura igual a 25mm foi de 1, ou seja, consideravelmente inferior ao determinado quando a espessura era de 40mm (1,13). Este valor, no entanto, continua acima do valor de referência apresentado na tabela 2.

Esta diferença de valores de MBV, deve-se provavelmente ao facto de cada material apresentar uma penetração de humidade característica (figura 35), no caso do betão de cerca de 6 mm no primeiro dia. Na amostra de betão com espessura igual a 40mm, verifica-se perda de massa ao longo dos ciclos de libertação (devido à saída de água concentrada abaixo do limite máximo de penetração de humidade) influenciando os valores do MBV prático. Este fenómeno já não deverá acontecer para a amostra de betão com espessura igual a 25mm.



**Figura 35:** Esquema exemplificativo da penetração máxima de humidade e da perda de humidade ao longo dos ciclos.

Foi também observado o efeito da área de exposição nos resultados do MBV. Assim, uma amostra de betão com espessura igual a 25mm e área de exposição de  $0,025\text{m}^2$ , de acordo com o especificado no NordTest, mostra o comportamento visível na figura 36.



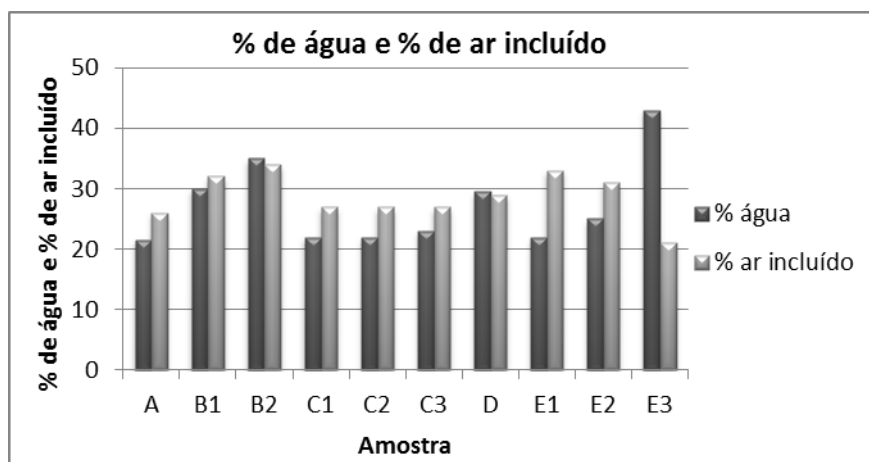
**Figura 36:** Variação temporal da massa de uma amostra de betão com área de exposição igual a  $0,025\text{m}^2$  perante variações cíclicas de humidade (MBV prático = 0,7).

O valor de MBV determinado para esta amostra é de 0,7. Este valor é ainda superior ao da tabela 2. No entanto, inferior ao valor da amostra de betão com 25mm de espessura e  $0,011\text{m}^2$  de área de exposição.

Durante os ensaios para determinar o MBV, as condições de ensaio na câmara climática (temperatura e ventilação) foram mantidas inalteráveis entre os diversos ensaios.

## 4.2. Propriedades das argamassas no estado fresco

As figuras 37 e 38 mostram a relação entre a % de água utilizada na preparação do amassado com a % de ar incluído e os valores da densidade, respectivamente.



**Figura 37:** % de água e de ar incluído em cada amassado.



A % de água utilizada na amassadura, % de ar incluído e a densidade do produto em fresco dependem directamente do tipo e quantidade de adjuvante que lhes é adicionado. Como tal, a amostra A corresponde à argamassa padrão; à B1 e B2 adicionou-se 5 e 7% de vermiculite expandida, respectivamente; às amostras C1, C2 e C3 adicionou-se 0,1, 0,15 e 0,2% de agentes expansivos; D corresponde à amostra padrão com 5% de vermiculite expandida e 0,1% de agente expansivo; às amostras E1, E2 e E3 adicionou-se 0,5, 1 e 2 de poliacrilato de sódio, respectivamente.

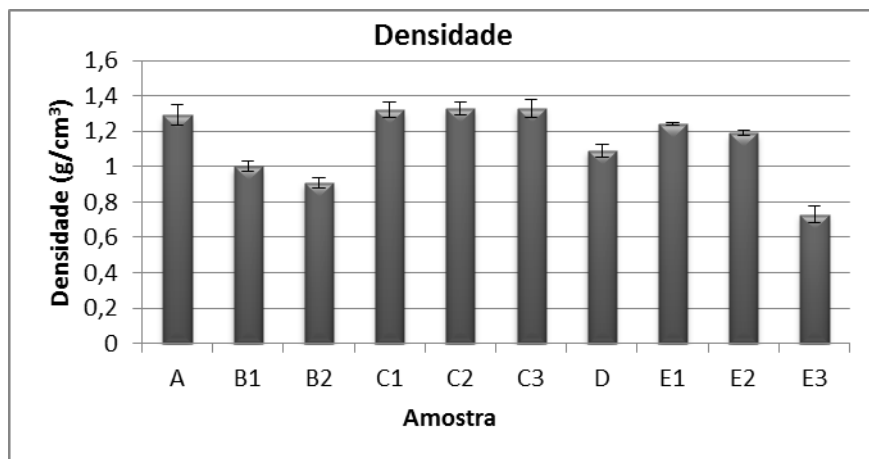
A adição de cargas leves acarreta aumento da % de água de amassadura para assegurar a trabalhabilidade adequada (espalhamento). De uma forma geral, as partículas de componentes leves (ex. perlite ou vermiculite expandida) têm área superficial elevada e finura granulométrica, pelo que tendem a absorver ou a sequestrar parte da água adicionada, sendo inferior o volume disponível para lubrificar o sistema.

Já a adição de partículas expansivas não acarreta prejuízo da trabalhabilidade da argamassa. A amostra D tem um comportamento intermédio entre B1 e C1. Finalmente, o uso de poliacrilato de sódio, em especial em teores superiores (amostra E3) extrema a perda de trabalhabilidade da argamassa, dada a elevada capacidade de retenção de água.

Quanto à % de ar incluído, as amostras B mostram um aumento considerável em relação à amostra padrão. Para isso contribui o facto de se introduzir um adjuvante com elevada porosidade intrínseca, cujas partículas têm forma geométrica não esférica. Nas amostras em que se adicionou o agente expansivo corrobora-se que os valores da % de ar incluído são próximos da amostra padrão.

Na amostra D, verifica-se um ajustamento da % de ar incluído (comparando com as amostras B1 e C1). As amostras que contêm poliacrilato de sódio apresentam teores de ar incluído próximos das amostras B. A excepção verifica-se na amostra E3, provavelmente, devido a uma estrutura diferente concebida pela % elevada, em volume, de poliacrilato de sódio.

A figura 38 apresenta os valores de densidade das argamassas, sendo óbvia a evolução descendente com a incorporação de componentes leves (amostras B e D). Já o uso de partículas expansivas de alumínio não afecta de forma clara a densidade, causando até ligeiro aumento dos valores. São por isso relevantes os efeitos da porosidade intrínseca dos componentes e da possível incorporação de ar nos amassados.



**Figura 38:** Densidade dos diversos amassados.

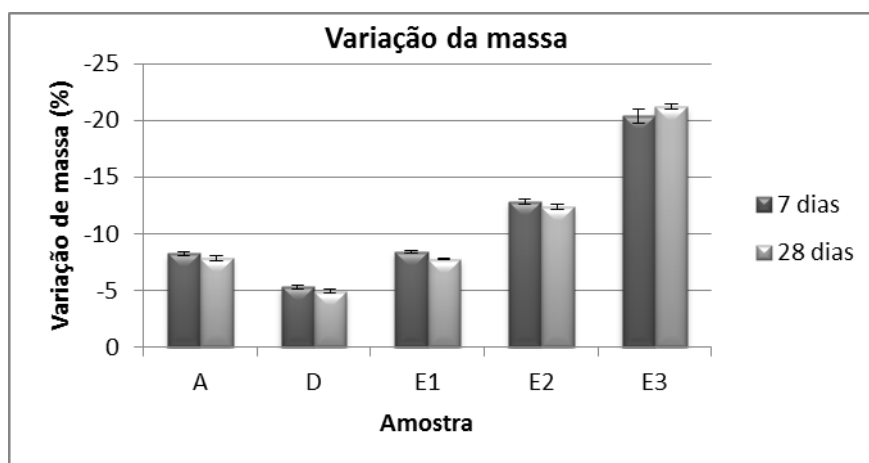
### 4.3. Propriedades das argamassas endurecidas

De referir, desde já, que as amostras B e C não serão objecto de análise detalhada no presente trabalho, pelo facto de terem sido já estudadas num trabalho recentemente realizado e em condições semelhantes às agora praticadas [8]. Em anexo são apresentados os resultados de todos os ensaios do referido trabalho. Adicionalmente, essas amostras foram testadas em termos de condutividade térmica, saturação/libertação e controlo de humidade, sendo aqui detalhado o seu comportamento.

#### 4.3.1. Variação de massa

Os valores da perda de massa das argamassas ao fim de 7 e 28 dias de cura são apresentados na figura 39. Estes valores deverão estar directamente relacionados com a quantidade de água de amassadura e tendem, de uma forma geral, a aumentar com a introdução crescente de componentes leves. A excepção observa-se com a amostra D, cuja perda de massa é inferior ao da argamassa padrão. Entre os 7 e 28 dias de cura a evolução é

negativa em quase todas as amostras, ou seja, observa-se ganho e não perda de massa. Isto pode significar que o processo de cura estará praticamente concluído ao fim de uma semana e que o material tende a absorver humidade a partir daí. A amostra E3 é a única que apresenta maior perda de massa ao fim de 28 dias de cura. O elevado teor relativo de água de amassadura pode requerer mais tempo de cura ou de libertação da fracção não combinada com os componentes ligantes.

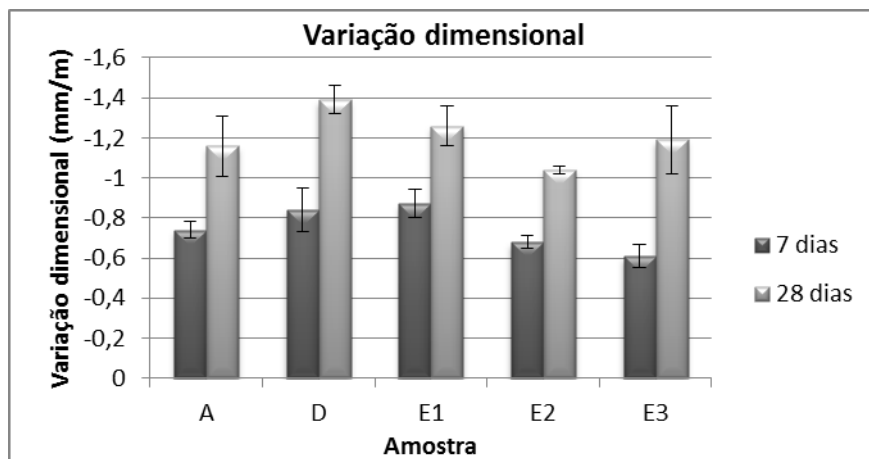


**Figura 39:** Variação da massa ao fim de 7 e 28 dias.

### **4.3.2. Variação dimensional**

A figura 40 mostra os resultados da variação dimensional linear das amostras ao fim de 7 e 28 dias de cura. Todas as amostras apresentam maior variação dimensional ao fim de 28 dias de cura, sendo a retracção resultante da perda de água de amassadura e dos processos de hidratação.

A amostra D é a que apresenta maior retracção após 28 dias de cura, apesar dos agentes expansivos terem por função produzir pequenas bolhas de ar, responsáveis por um ligeiro aumento de volume. As amostras E não apresentam um comportamento de acordo com o teor de adjuvante adicionado, pois a amostra E1 deveria apresentar menor variação dimensional que as restantes.



**Figura 40:** Variação dimensional das amostras ao fim de 7 e 28 dias de cura.

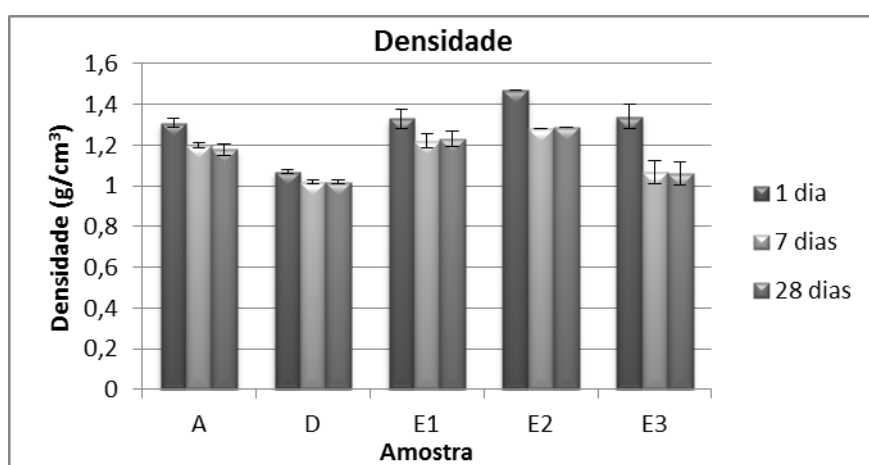
Seria expectável que houvesse uma relação directa entre a perda de massa e a variação dimensional. No entanto, nas argamassas tal relação nem sempre acontece devido à introdução de adjuvantes que alteram a sua microestrutura. Ou seja, ao introduzir partículas de diferente morfologia e granulometria, quebra-se a relação entre a perda de massa e a variação dimensional. Portanto, a introdução de partículas com formato não esférico e de elevada porosidade intrínseca induz variações dimensionais significativas.

Às amostras E, para além dos factores acima referidos, acresce o facto de conterem alguma água de amassadura ou absorvida do meio envolvente que pode provocar o desenrolamento das cadeias do poliacrilato de sódio (daí o comportamento não monótono acima referido).

#### 4.3.3. Densidade aparente

A figura 41 mostra os valores da densidade aparente das argamassas ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura. A diminuição com o tempo de cura, em especial entre 1 e 7 dias, resulta da perda de água não comprometida na formação de hidratos. Como este processo está quase concluído ao fim de 7 dias, a evolução a partir daí é mais ténue. Pode até acontecer inversão, caso a argamassa tenha tendência para absorver humidade e algumas formulações foram especialmente desenhadas com esse propósito e também devido aos processos de carbonatação.

A amostra D é a que apresenta menor densidade nos três momentos em que se realizaram medições, com valores inferiores aos da amostra padrão. Este resultado traduz o efeito expansivo dos agentes utilizados, com a criação de porosidade extra no material. As amostras E1 e E2 possuem densidades semelhantes e ligeiramente superiores ao da amostra padrão ao fim de 28 dias, talvez porque seja influente a tendência para absorverem humidade, mas também devido às alterações, acima referidas, na estrutura da argamassa. Ao fim de 7 e 28 dias de cura, a amostra E3 apresenta menor densidade do que a amostra padrão, devido à estrutura e densidade do adjuvante adicionado e à saída de água de amassadura, ficando a argamassa com uma estrutura bastante porosa.



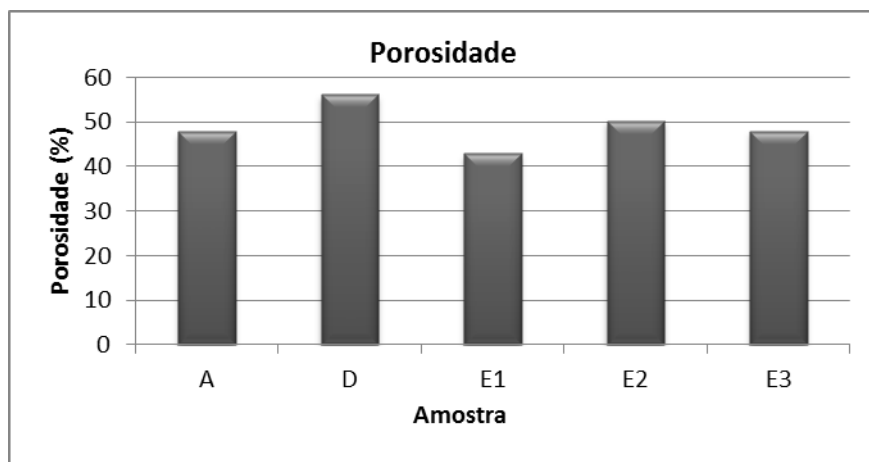
**Figura 41:** Densidade das argamassas ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura.

#### **4.3.4. Porosidade**

A figura 42 mostra os valores da porosidade das amostras padrão, D e E. A amostra E1 é a única que apresenta menor % de porosidade em relação à amostra padrão, sendo a amostra E3 a que apresenta um valor semelhante à padrão. Por sua vez, as amostras E2 e D são as que apresentam maior % de porosidade, sendo mais elevado nesta última.

Os valores da % de porosidade dependem directamente da % de água utilizada na amassadura e do tipo e quantidade de adjuvante adicionado à argamassa. A amostra D, devido à introdução de cargas leves de elevada porosidade intrínseca, é a mais porosa. Quanto às amostras E seria de esperar um aumento de porosidade à medida que se aumenta a % de poliacrilato de sódio, devido ao consequente aumento da % de água no amassado.

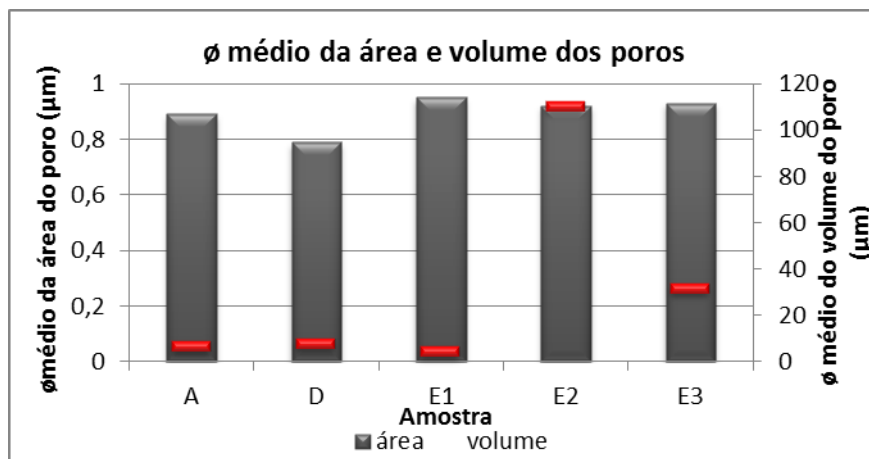
No entanto, tal não se verifica para a amostra E3, possivelmente devido há presença de água que faz com que as cadeias deste polímero se desenrolem e “fechem” alguns poros.



**Figura 42:** % de porosidade das diversas amostras ao fim de 28 dias de cura.

A porosimetria de mercúrio permite também determinar o diâmetro médio dos poros (área e volume), estando os valores apresentados na figura 43. O diâmetro médio da área de poro e o seu volume médio são factores relevantes na absorção de água por capilaridade.

A amostra D é a única que apresenta um diâmetro médio da área de poro inferior à amostra padrão. As amostras E apresentam valores ligeiramente superiores, no entanto, muito próximos entre si. Em relação ao diâmetro médio do volume de poro, as amostras E2 e E3 apresentam valores acima das restantes, em especial a amostra E2. Mais uma vez, estes dados podem ser afectados pela existência de uma fracção de poliácrlato de sódio que tenha sofrido expansão em contacto com água.

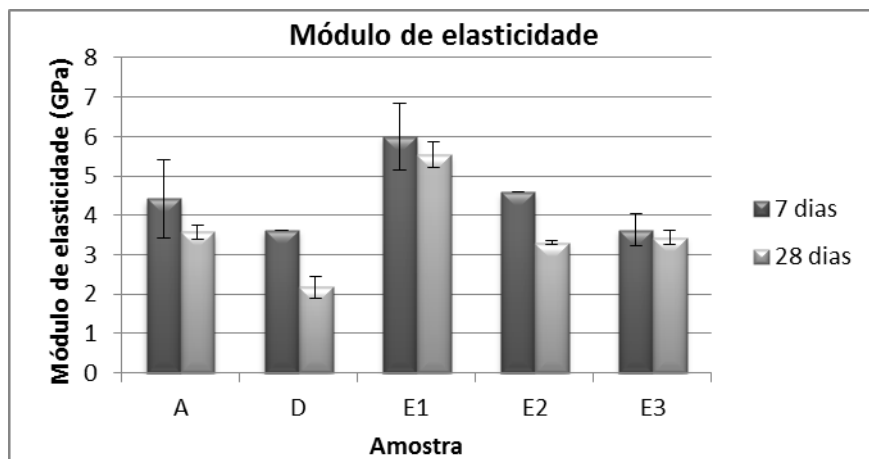


**Figura 43:** Valores do diâmetro médio da área e do volume dos poros de cada amostra.

#### 4.3.5. Módulo de elasticidade

A figura 44 mostra os valores do módulo de elasticidade das amostras curadas durante 7 e 28 dias. Em sintonia com a evolução da densidade aparente, as amostras tendem a apresentar diminuição do módulo de elasticidade com o tempo de cura, ou seja, menor rigidez. Este efeito traduz o aumento relativo da fracção de poros no material, uma vez cessado o processo de hidratação e em consequência da remoção do excesso de água na estrutura, não comprometida no processo de hidratação.

Entre as diferentes amostras, a gradação de valores segue a relação directa com a densidade e a porosidade de cada uma. Portanto, a amostra D é a que apresenta menor valor de módulo de elasticidade. Entre as amostras E, apenas a E1 apresenta, ao fim de 28 dias de cura, valor superior à amostra padrão. As restantes amostras em que se adicionou poliacrilato de sódio apresentam um comportamento semelhante ao fim dos 28 dias de cura.



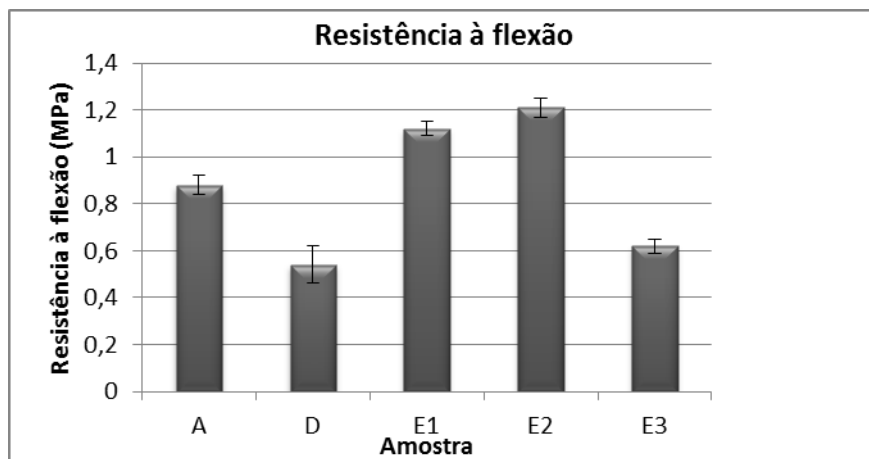
**Figura 44:** Valores do módulo de elasticidade das argamassas curadas durante 7 e 28 dias.

#### 4.3.6. Resistência mecânica

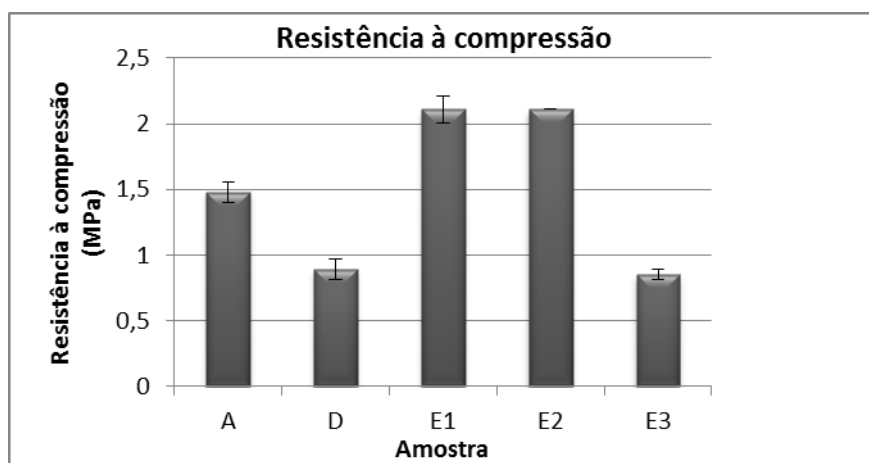
Os valores de resistência à flexão de amostras curadas durante 28 dias são apresentados na figura 45. Observa-se a esperada relação entre estes valores e a densidade aparente e porosidade das amostras. Nesse sentido, as argamassas D e E3 são as menos resistentes.

A gradação nos valores da resistência à compressão é semelhante (figura 46). As amostras E1 e E2 possuem valores idênticos. A amostra E3 é a menos resistente de entre todas as estudadas, ainda que em flexão fosse ligeiramente melhor que a amostra D. Num esforço de flexão, a existência de partículas com maior razão de aspecto e superior flexibilidade, como são previsivelmente as de poliacrilato de sódio, pode garantir acréscimo de resistência sem ruptura.





**Figura 45:** Resistência à flexão das argamassas curadas durante 28 dias.



**Figura 46:** Resistência à compressão das argamassas curadas durante 28 dias.

#### 4.3.7. Coeficiente de absorção de água por capilaridade

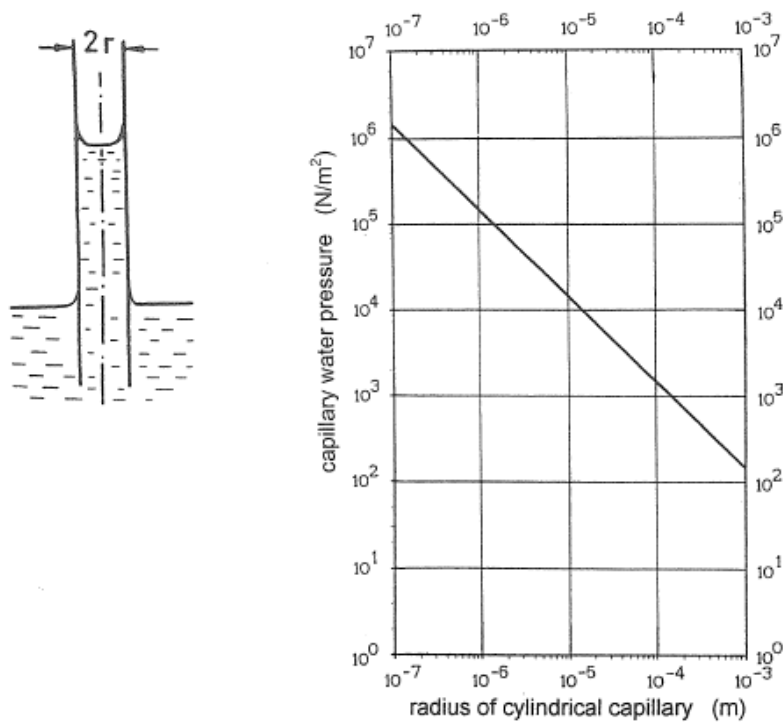
Os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade das amostras curadas durante 28 dias são apresentados na figura 48. Apenas a amostra D apresenta um valor de coeficiente de absorção de água por capilaridade superior à amostra padrão. As amostras E apresentam valores abaixo da amostra padrão, mas próximos entre si.

A existência de canais de porosidade interligada, tal como a área e volume dos poros são factores influentes na absorção de água por capilaridade. A equação 13 traduz o rácio causado por uma diferença de pressão provocada pelo contacto de um fluido com uma superfície sólida e o raio do poro.

$$P = \frac{2\gamma}{r} \quad (\text{Equação 13})$$

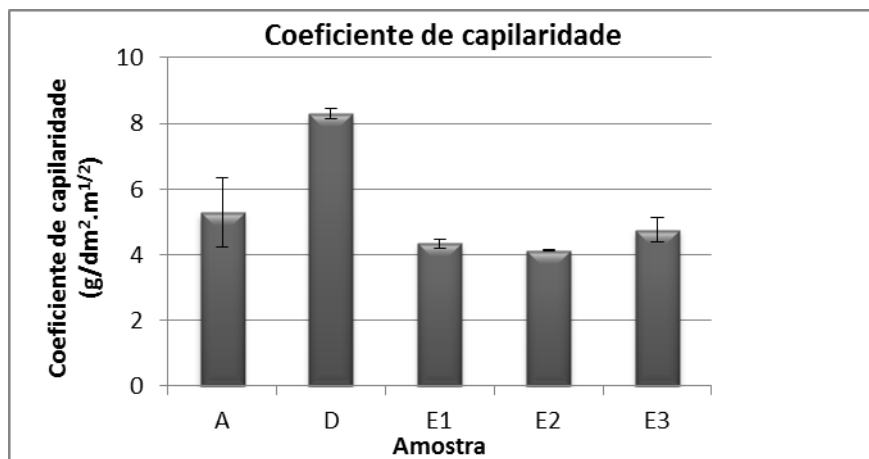
Onde P é a pressão de ascensão capilar,  $\gamma$  a tensão superficial e r o raio do poro [58].

Analisando a equação acima constata-se que poros de raio maior criam menor pressão de ascensão capilar, sendo este fenómeno dominado pelos poros de menor raio (figura 47). Estes poros dão origem a velocidades iniciais de absorção menores mas a maior quantidade de água absorvida, demorando mais tempo a saturar [58,59].



**Figura 47:** Pressão de ascensão capilar em função do raio do poro [58].

Recorrendo à figura 43 para ajudar a justificar os valores do coeficiente de absorção capilar, observa-se que a amostra D é a que apresenta poros mais pequenos, criando uma maior pressão de ascensão capilar. As amostras E apresentam poros de maior raio e conseqüentemente menor pressão de ascensão capilar. Outro dado importante para justificar as diferenças é o facto do poliacrilato de sódio poder ‘cortar’ porosidade comunicante, por se encontrar parcialmente ou totalmente expandido.

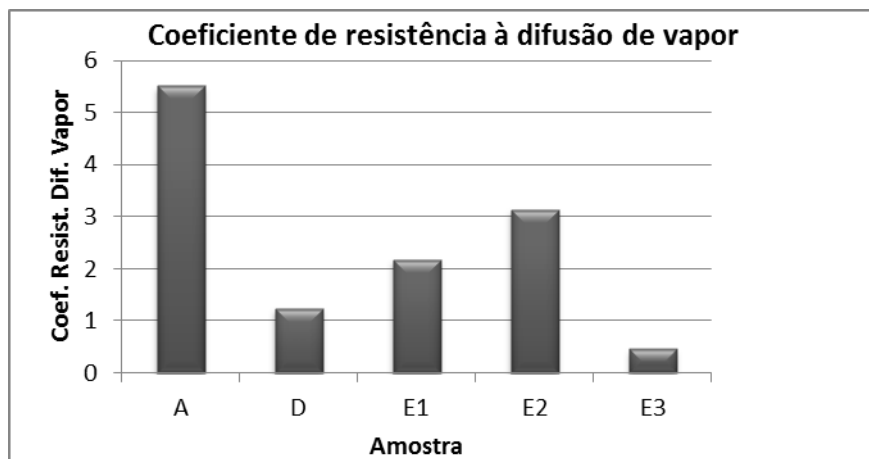


**Figura 48:** Coeficiente de absorção de água por capilaridade de amostras curadas durante 28 dias.

#### 4.3.8. Coeficiente de resistência à difusão de vapor

A figura 49 mostra os valores do coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das várias amostras, após cura de 28 dias. A amostra padrão é a que oferece maior resistência à difusão de vapor de água, enquanto a amostra E3 é a mais permeável.

A % de porosidade de cada amostra e o facto de os poros estarem ou não conectados são os factores mais importantes na determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor. As amostras E1 e E2 apresentam valores superiores a E3 possivelmente devido ao “corte” dos canais comunicantes por parte do poliacrilato de sódio. Como a amostra E3 necessitou de uma grande quantidade de água na amassadura, possui porosidade aberta e comunicante em quantidade suficiente para não se verificar o efeito de “corte” criado pelo adjuvante.

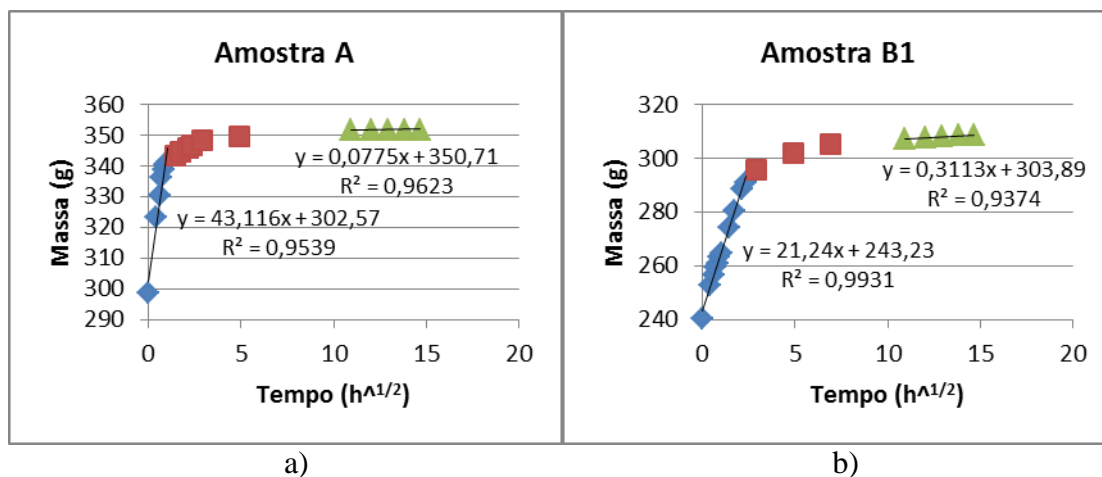


**Figura 49:** Resultados do coeficiente de resistência à difusão de vapor das diversas formulações.

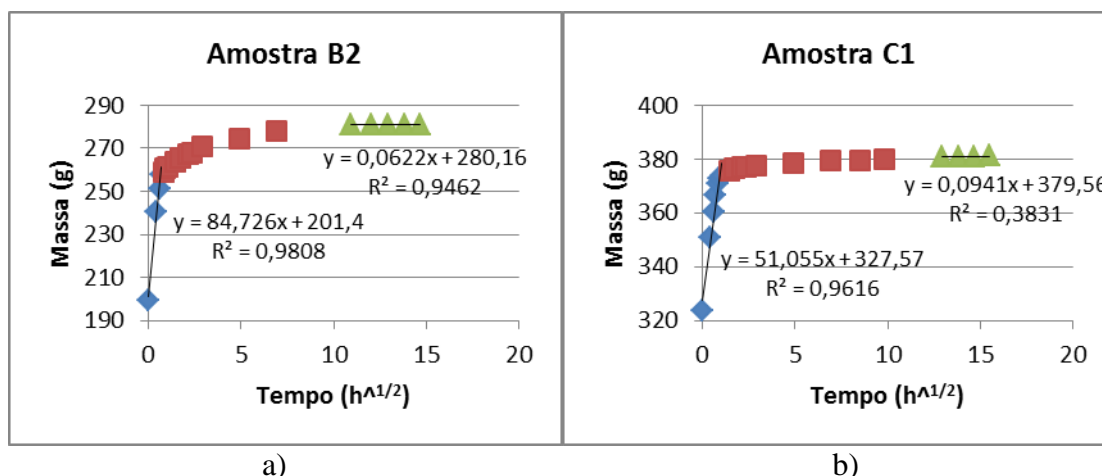
#### 4.3.9. Saturação/Libertação de água

As figuras 50 a 54 mostram o ganho de massa das amostras curadas durante 28 dias, até à saturação por incorporação de água. Este processo foi dividido em três estágios: i) corresponde a uma velocidade de absorção superior, sendo provavelmente controlado pela acção dos poros de maior tamanho, pois numa fase inicial são eles que determinam maior velocidade de saturação; ii) corresponde a um estágio de transição, entre a acção dos poros de maior tamanho e os de menor tamanho no controlo da velocidade de saturação; iii) este estágio é caracterizado por velocidades de absorção de água mais lentas e de aproximação a um regime estacionário [59].

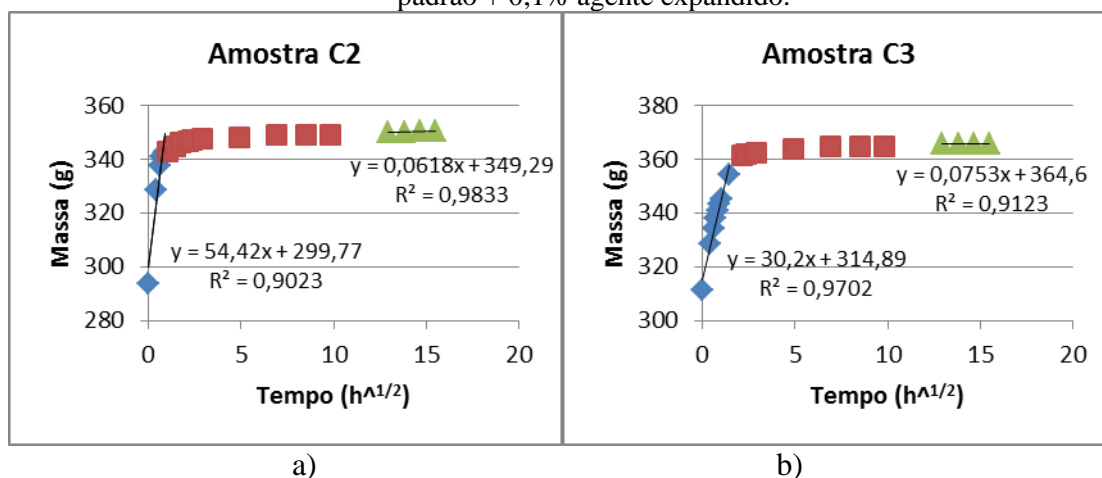
As amostras E1 e E2 não seguem este tipo de comportamento. Apesar de apresentarem três estágios, a velocidade da zona que corresponde ao estágio descrito em i) é de tal forma acentuada que não é possível caracterizá-lo com rigor. No entanto, estes estágios apresentam velocidades de absorção inferiores mas tempos de saturação longos.



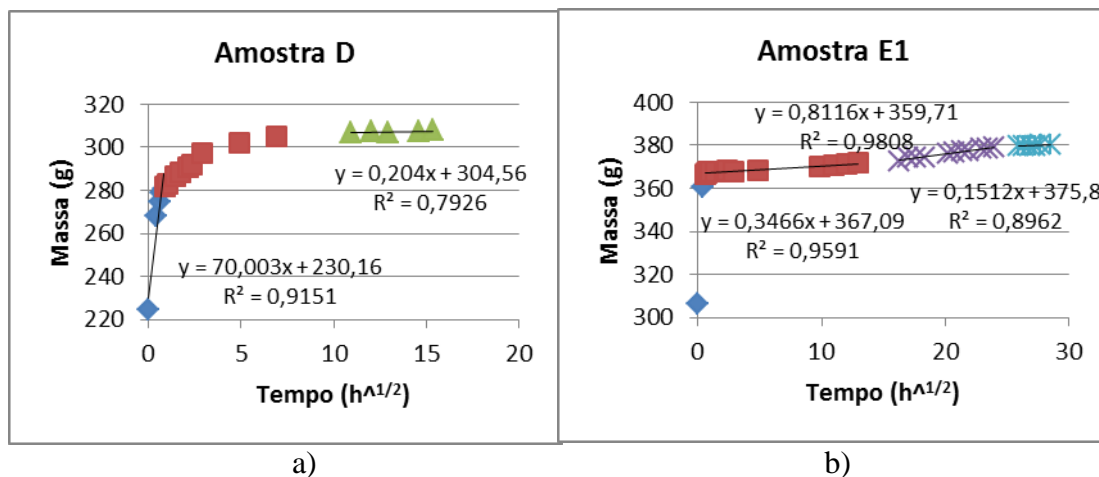
**Figura 50:** Resultados do teste de saturação de água; a) amostra padrão; b) padrão + 5% vermiculite expandida.



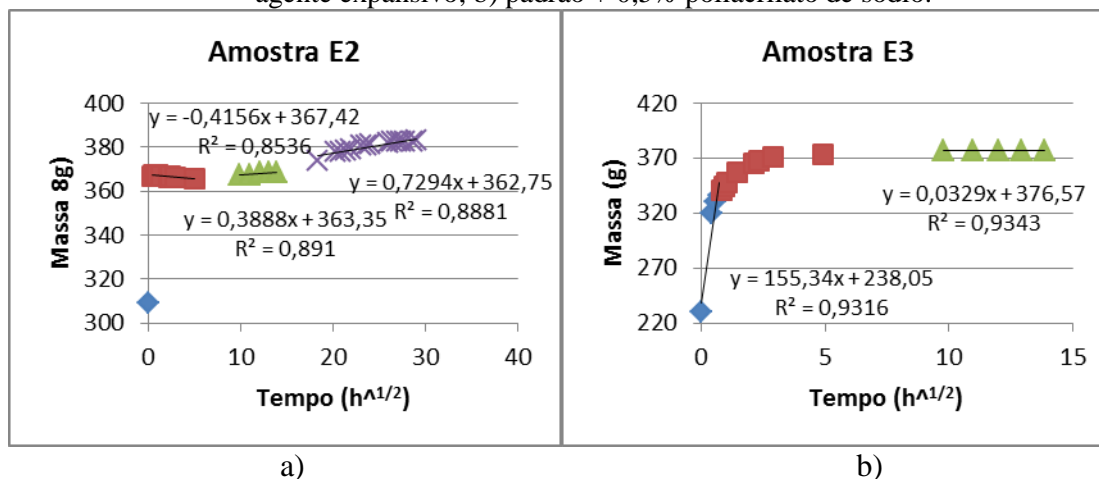
**Figura 51:** Resultados do teste de saturação de água; a) padrão + 7% vermiculite expandida; c) padrão + 0,1% agente expandido.



**Figura 52:** Resultados do teste de saturação de água; a) padrão + 0,15% agente expansivo; b) padrão + 0,2% agente expansivo.



**Figura 53:** Resultados do teste de saturação de água; a) padrão + 5% vermiculite expandida + 0,1% agente expansivo; b) padrão + 0,5% poliacrilato de sódio.



**Figura 54:** Resultados do teste de saturação de água; a) padrão + 1% poliacrilato de sódio; b) padrão + 2% poliacrilato de sódio.

A tabela 7 mostra, de forma compilada, os valores dos declives das curvas, anteriores estimados para as várias zonas de comportamento, bem como os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) do ajuste linear. Indica ainda a duração de cada estágio.

**Tabela 7:** Valores dos declives, correlações e tempos de estágio de saturação de vapor de água.

Amostra	Estágio 1			Estágio 2			Estágio 3		
	Declive	R <sup>2</sup>	Tempo (h)	Declive	R <sup>2</sup>	Tempo (h)	Declive	R <sup>2</sup>	Tempo (h)
A	43,116	0,9534	2	---	---	---	0,0775	0,9623	120
B1	21,24	0,9931	5,5	---	---	---	0,3113	0,9374	120
B2	84,726	0,9808	0,5	---	---	---	0,0622	0,9462	120
C1	51,055	0,9616	0,83	---	---	---	0,0941	0,3831	168
C2	54,42	0,9023	0,67	---	---	---	0,0618	0,9833	168
C3	30,2	0,9702	2	---	---	---	0,0753	0,9123	168
D	70,003	0,9151	0,5	---	---	---	0,204	0,7926	120
E1	0,3466	0,9591	168	0,8116	0,9808	576	0,1512	0,8962	672
E2	-0,4152	0,8536	24	0,3888	0,891	192	0,7294	0,8881	672
E3	155,34	0,9316	0,5	---	---	---	0,0329	0,9343	96

Os valores do estágio 2 de todas amostras, excepto E1 e E2, não serão alvo de discussão, pois encontram-se numa zona de transição não linear.

Como referido anteriormente, o primeiro estágio é fortemente influenciado pelos poros de maior dimensão e pelo volume total de poros da amostra. A higroscopicidade de um material depende da quantidade e tamanho dos poros, portanto, a saturação de poros de maior dimensão só é alcançada para teores de humidade superiores a 98% [8]. Daí poder-se correlacionar os declives do primeiro estágio com a higroscopicidade do material. De uma forma geral, o ajuste linear é representativo ( $R^2 > 0,9$ , com excepção de E2).

A amostra padrão apresenta um comportamento intermédio. Em relação às amostras B, observa-se que o aumento do teor de adjuvante induz aumento da velocidade de saturação e diminui drasticamente o tempo necessário para se completar este estágio. As amostras C apresentam um comportamento semelhante entre si, com excepção da amostra C3, que contrariamente ao expectável apresenta velocidade de absorção inferior e tempo de estágio superior. Com a introdução de maior quantidade de pós expansivos na formulação era de prever a criação de poros de maior volume e a velocidade de absorção de água neste estágio seria superior.

A amostra D apresenta um comportamento próximo da amostra padrão, de acordo com os resultados de porosimetria (figura 43), particularmente dos valores do diâmetro médio dos poros e do seu volume total.

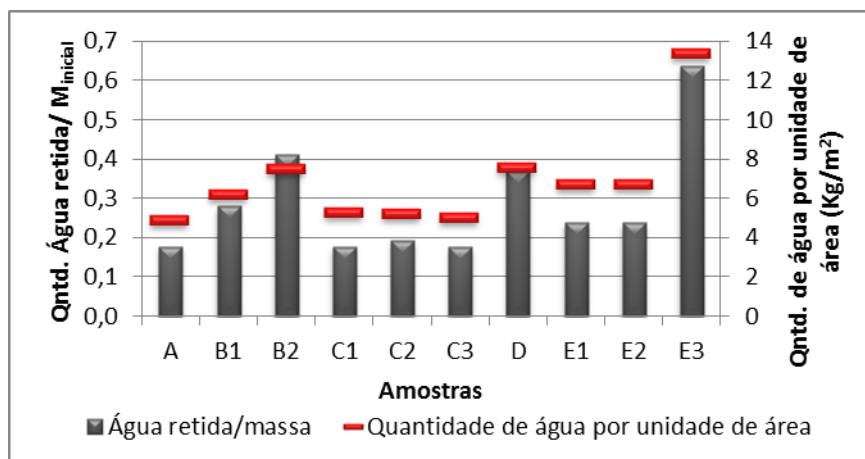
Em relação às amostras E torna-se difícil comparar o seu desempenho com as restantes argamassas, especialmente as amostras E1 e E2, devido ao seu comportamento distinto. A amostra E3 é a que apresenta maior velocidade de saturação, de acordo com as análises de porosimetria (figura 43).

O terceiro e último estágio é caracterizado por velocidades de absorção mais reduzidas (valor de declive inferior), fruto do tempo de saturação a que as amostras já foram sujeitas e da proximidade da saturação completa das amostras em que os poros de maior volume já estão preenchidos com água. No entanto, as amostras B1, D, E1 e E2, apresentam velocidades de absorção relativamente superiores às restantes. As amostras B1 e D têm em comum o tipo e quantidade de adjuvante adicionado, possivelmente um factor influente para explicar este acontecimento. Por sua vez, o comportamento das amostras E1 e E2, assumidamente distinto das restantes amostras, é de difícil interpretação.

Utilizando a amostra padrão com referência, constata-se que as amostras B e D têm tempos de saturação semelhantes (120h). As amostras C apresentam tempo de saturação superior (168h) e, por fim, as amostras E exibem valores extremos: a amostra E3 é a mais rápida (96h) e as restantes marcadamente mais lentas (672h).

Os estudos de saturação permitem também determinar a quantidade de água retida em cada amostra até se atingir o ponto de saturação. Estes resultados são apresentados na figura 55.



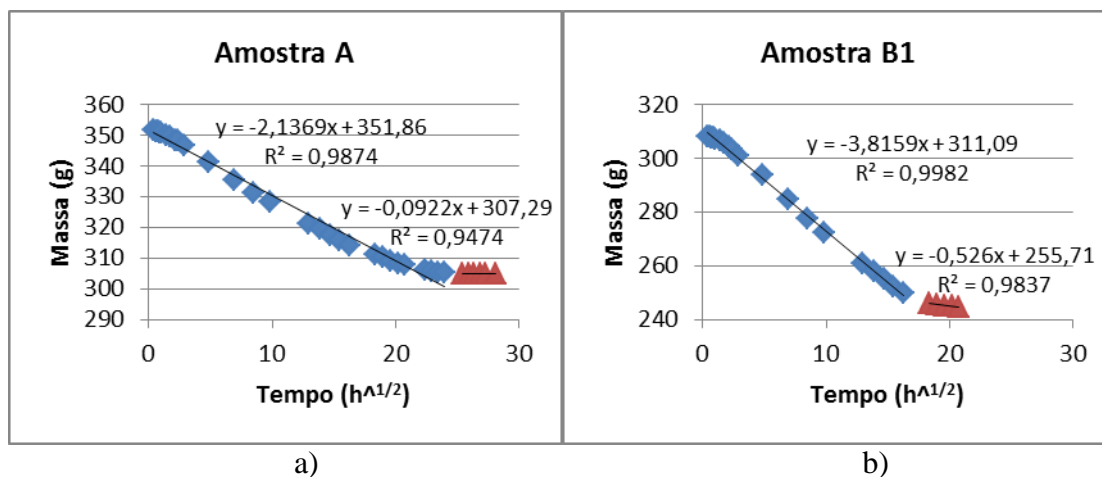


**Figura 55:** Quantidade total de água absorvida pelas diversas amostras.

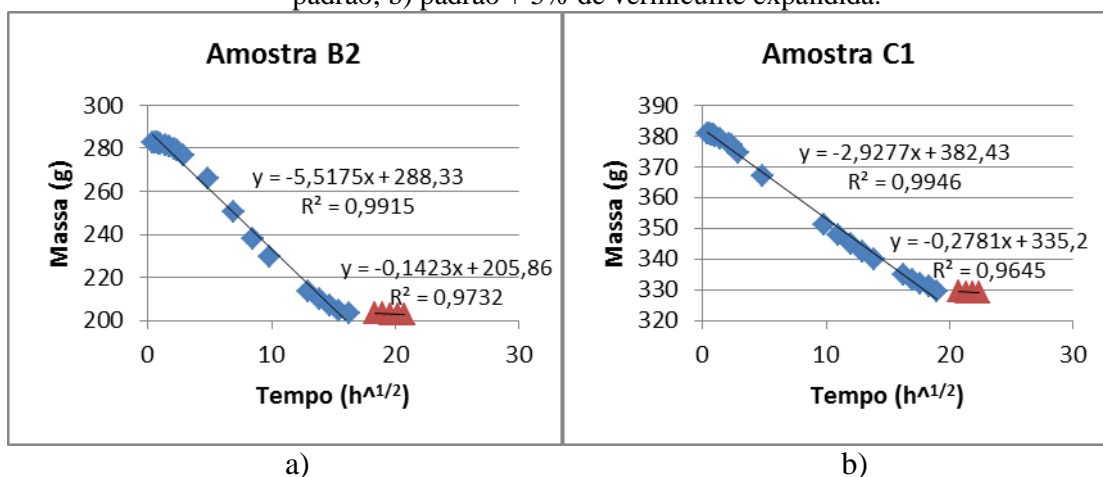
As amostras C apresentam valores semelhantes aos da amostra padrão relativamente às duas variáveis estudadas. Mais uma vez, estas amostras apresentam um comportamento deficiente, pois o adjuvante adicionado deveria criar um aumento de porosidade. Todas as outras amostras apresentam um desempenho superior à amostra padrão.

Nas amostras B corrobora-se que o aumento do teor de vermiculite expandida melhora a capacidade de reter humidade na estrutura, uma vez que este adjuvante possui elevada fracção de porosidade intrínseca. A amostra D apresenta um valor semelhante a B2, verificando-se que a acção conjunta da vermiculite expandida e do agente expansivo é mais eficaz do que quando usados individualmente. Por fim, nas amostras E, a introdução de teores de poliacrilato de sódio inferiores a 1% é menos eficaz do que a utilização de vermiculite. A amostra E3 é, de longe, a amostra com melhor desempenho, devido ao teor de poliacrilato adicionado e à porosidade criada pela evaporação de água usada no processo de amassadura.

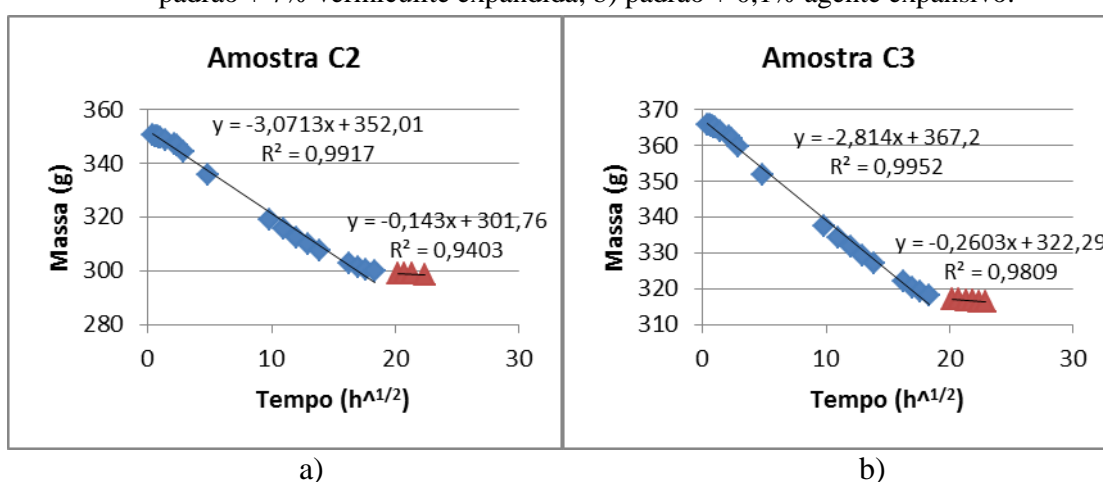
As figuras 56 e 60 mostram a perda de humidade das amostras, na fase de secagem após o teste de saturação. Este processo é caracterizado por dois estágios distintos: (i) o primeiro traduz uma perda mais acentuada, como se verifica pelo declive das rectas; (ii) o segundo a indicar a tendência para o equilíbrio, correspondente ao teor máximo perdido pelas amostras. Em todos os casos, o ajuste linear origina coeficientes de correlação elevados, particularmente na primeira fase do processo ( $R^2 > 0,98$ ).



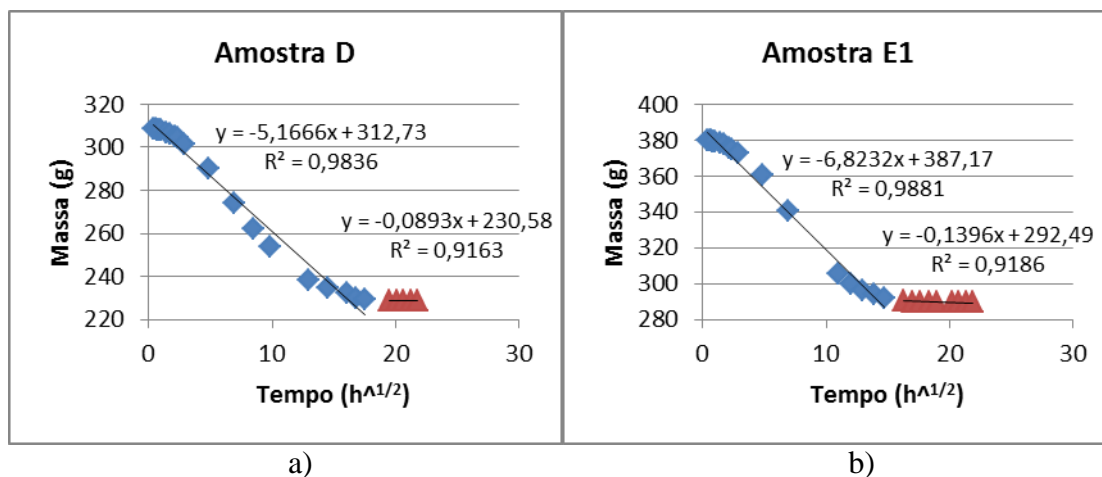
**Figura 56:** Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão; b) padrão + 5% de vermiculite expandida.



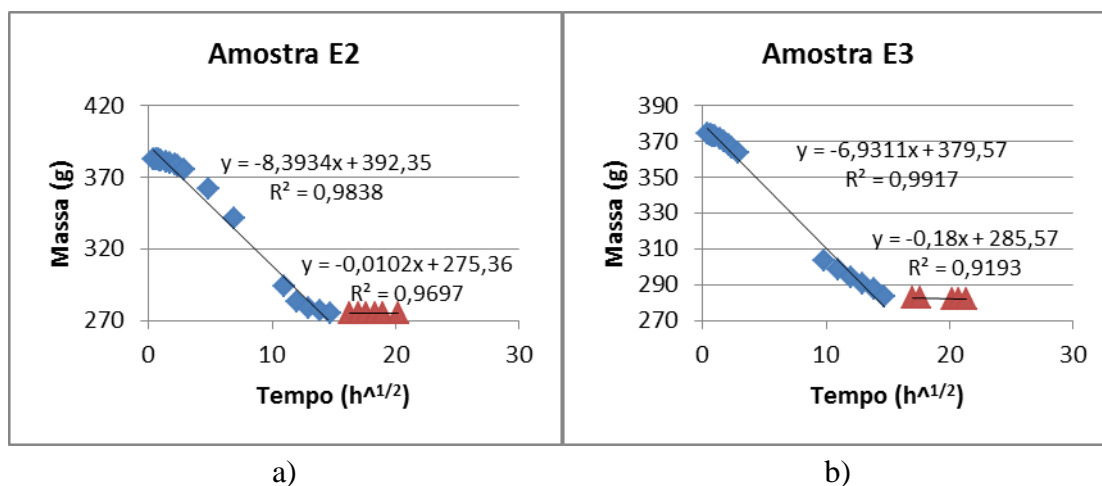
**Figura 57:** Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 7% vermiculite expandida; b) padrão + 0,1% agente expansivo.



**Figura 58:** Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 0,15% agente expansivo; b) padrão + 0,2% agente expansivo.



**Figura 59:** Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 5% vermiculite expandida + 0,1% agente expansivo; b) padrão + 0,5% de poliacrilato de sódio.



**Figura 60:** Resultados do teste de libertação de humidade de amostras previamente saturadas; a) padrão + 1% de poliacrilato de sódio; b) padrão + 2% de poliacrilato de sódio.

De uma forma análoga à tabela 7, a tabela 8 mostra a compilação dos declives das rectas e coeficientes de correlação do ajuste do comportamento das amostras na fase de libertação de água. Mostra também a o tempo total ou acumulado do ensaio.

**Tabela 8:** Declives das rectas e coeficientes de correlação do ajuste do comportamento das amostras na fase de libertação de água.

Amostra	Estágio 1			Estágio 2		
	Declive	R <sup>2</sup>	Tempo (h)	Declive	R <sup>2</sup>	Tempo (h)
A	-2,1369	0,9874	576	-0,0922	0,9474	648
B1	-3,8951	0,9982	264	-0,526	0,9837	336
B2	-5,5175	0,9915	264	-0,1423	0,9732	336
C1	-2,9277	0,9946	360	-0,2781	0,9645	432
C2	-3,0713	0,9917	336	-0,143	0,9403	408
C3	-6,9311	0,9917	264	-0,18	0,9193	288
D	-5,1666	0,9833	308	-0,0893	0,9193	380
E1	-6,8232	0,9881	216	-0,1396	0,9186	264
E2	-8,3934	0,9838	216	-0,0102	0,9697	264
E3	-6,9311	0,9917	216	-0,18	0,9193	288

O primeiro estágio corresponde à perda de maior quantidade de água, sendo naturalmente o estágio mais prolongado, como se pode observar na tabela 8. Quanto mais negativo for o declive maior será a velocidade de libertação de água das amostras. Neste estágio a água é transportada por capilaridade até à superfície pelos poros de maior dimensão. A amostra A é a que requer mais tempo para libertar a água retida (ou menor velocidade de libertação), em consequência do facto de ser constituída por poros de menor dimensão. A velocidade de libertação aumenta sequencialmente nas amostras C, D, B e E, revelando melhor desempenho.

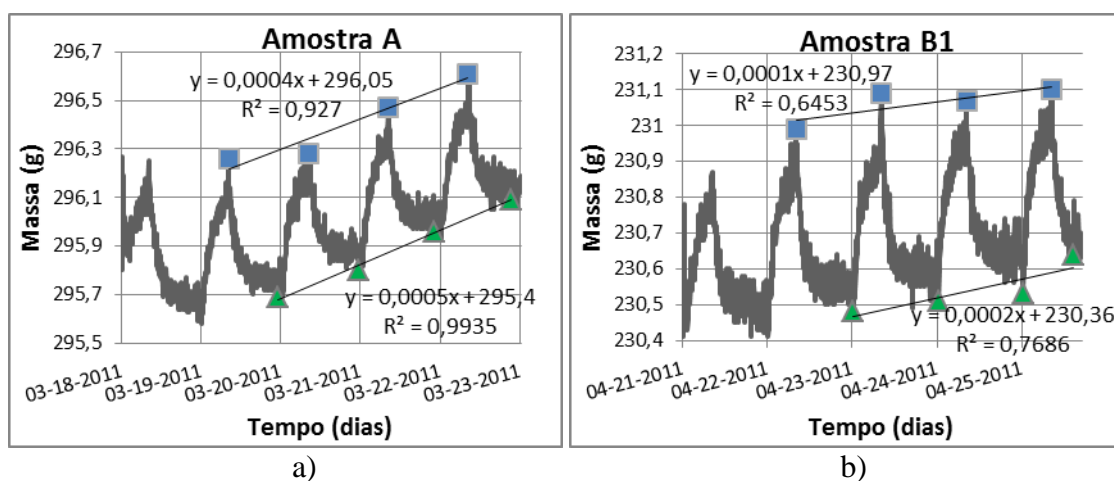
O segundo estágio corresponde à saída de água retida nos poros mais pequenos, por processos de difusão. Em termos relativos, a velocidade relativa das amostras nesta etapa é semelhante à anterior. A amostra A é a mais lenta e as amostras E são as que respondem mais rapidamente, ainda que a análise destas últimas mereça alguma precaução pelo facto de poderem começar a absorver humidade do meio envolvente antes de se atingir o ponto de equilíbrio (valor máximo) de libertação de água.

A comparação entre os tempos de saturação e libertação (terceiro e segundo estágio das tabelas 7 e 8, respectivamente), indica que todas as amostras possuem maior dificuldade em libertar água do que na sua absorção (em termos de velocidade e volume

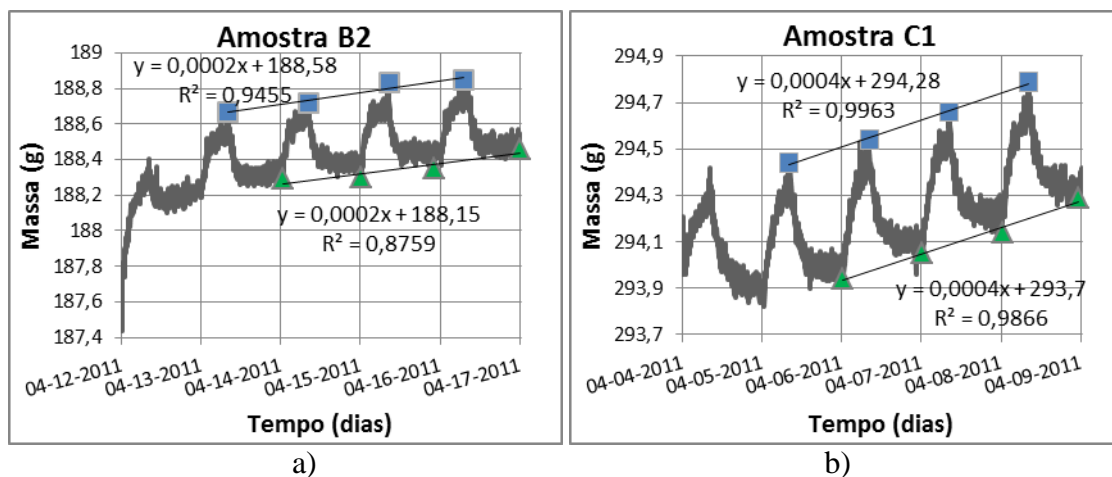
total), o que traduz tendência para um estado indesejável de saturação num prazo mais ou menos longo.

#### 4.3.10. MBV prático

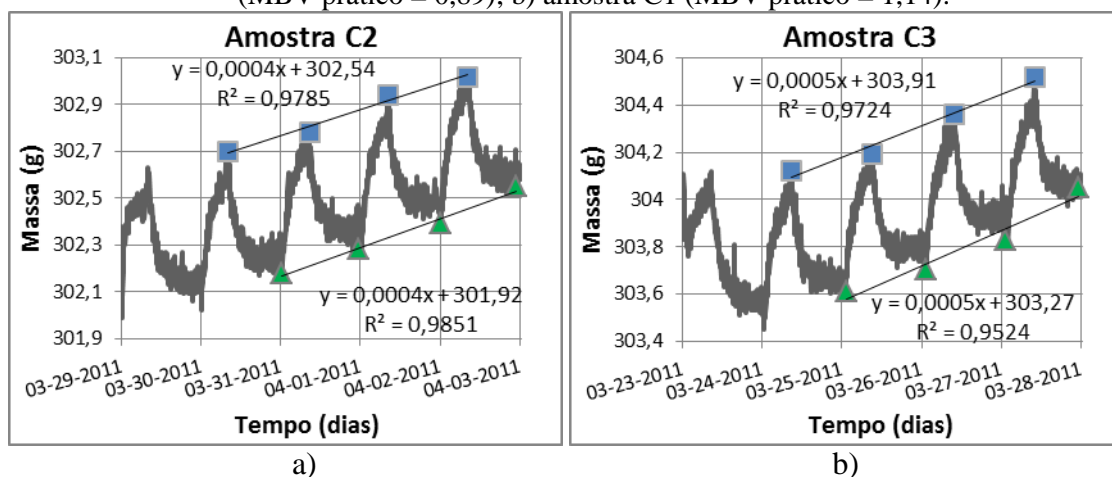
Os valores do MBV prático foram estimados após cinco dias/ciclos de ensaios na câmara climática, com variações cíclicas de humidade relativa (Hr): 8 horas com 75% de Hr + 16 horas a 33% Hr. A evolução da massa das amostras perante aquelas variações de humidade ilustra-se nas figuras 61 a 65. No entanto, com as amostras B1 e D não se completaram cinco dias de teste, devido a falha de energia. Ainda assim, os valores obtidos são considerados válidos, uma vez que o NordTest prescreve um mínimo de três ciclos para determinar o MBV.



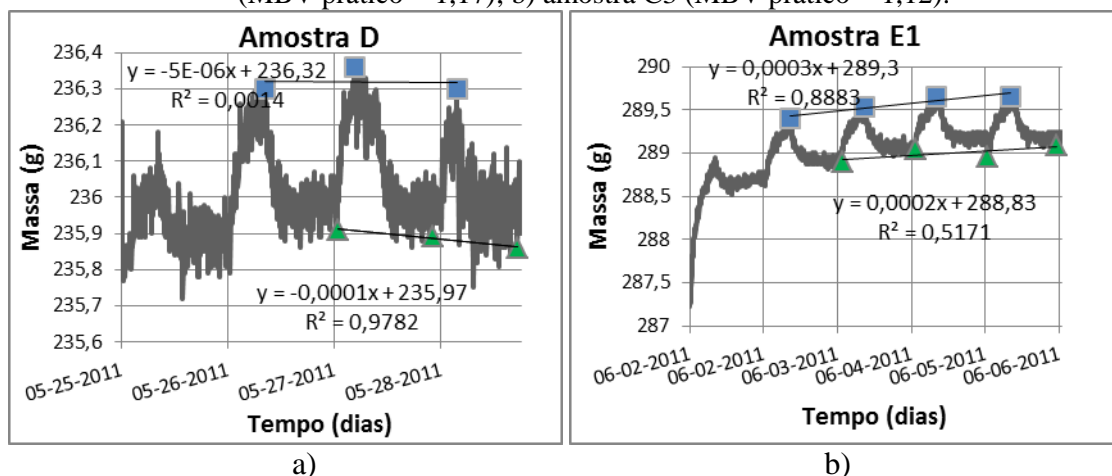
**Figura 61:** Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra A (MBV prático = 1,13); b) amostra B1 (MBV prático = 1,14).



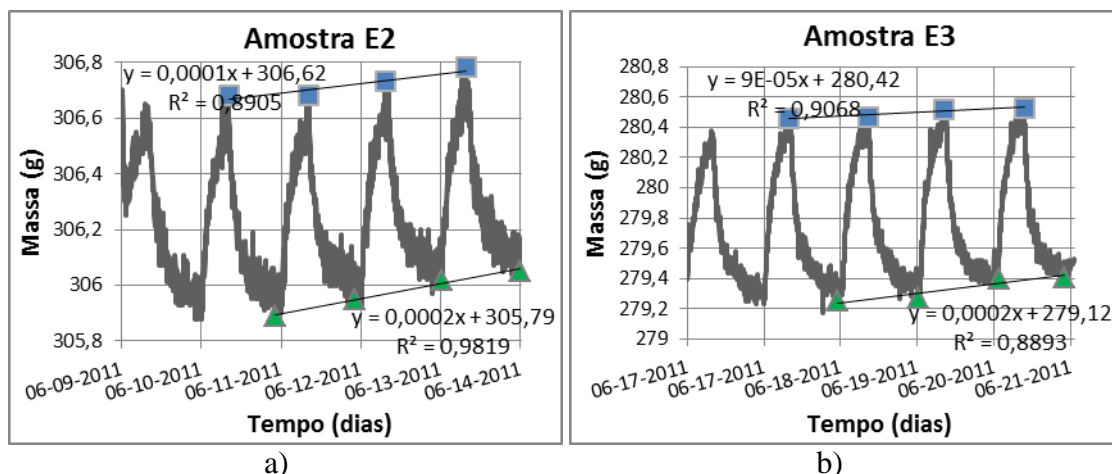
**Figura 62:** Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra B2 (MBV prático = 0,89); b) amostra C1 (MBV prático = 1,14).



**Figura 63:** Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra C2 (MBV prático = 1,17); b) amostra C3 (MBV prático = 1,12).



**Figura 64:** Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra D (MBV prático = 0,9); b) amostra E1 (MBV prático = 1,32).



**Figura 65:** Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; a) amostra E2 (MBV prático = 1,62); b) amostra E3 (MBV prático = 2,53).

A espessura e acabamento superficial das amostras eram semelhantes. A temperatura e as condições de ventilação na câmara foram também mantidas constantes.

Numa análise global do comportamento das argamassas verifica-se que todas elas tendem a ir ganhando massa a cada novo ciclo, ou seja, a fase de libertação de humidade não parece ser tão completa ou rápida como o avanço da incorporação. Isto significa perda de reversibilidade e desempenho no ajuste do teor de humidade e, se extremado, este comportamento pode conduzir à saturação, como atrás se indicou. O efeito de histerese comportamental traduz graus de dificuldade ou velocidades distintas no mecanismo de adsorção e desadsorção e sugere a possível necessidade de incrementar a ventilação forçada na atmosfera para auxiliar o processo de libertação de humidade.

As amostras B2 e E1 começam por mostrar elevada capacidade de adsorção de humidade, nomeadamente no primeiro ciclo. Como na determinação do MBV se desprezam os resultados do primeiro ciclo, a superior rapidez inicial de adsorção das referidas amostras acaba por não se reflectir no aumento dos valores deste parâmetro.

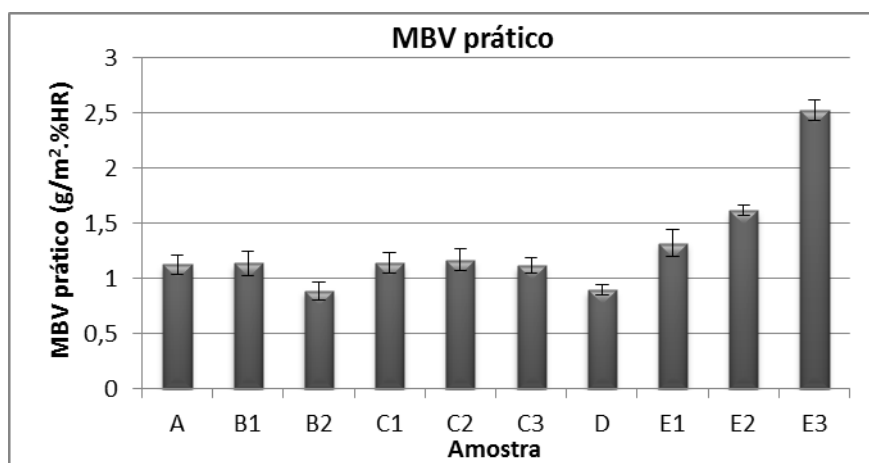
Verifica-se, com excepção da amostra D, que existe uma relação entre a velocidade de absorção e de libertação. Isto significa que apesar de todas as amostras apresentarem tendência de saturação a longo prazo, a velocidade com que libertam humidade é idêntica à velocidade com que a absorvem.

A figura 66 mostra os valores de MBV prático medidos. As amostras B2, C3 e D apresentam valores inferiores aos da amostra padrão, apesar das amostras B2 e D evidenciarem capacidade para reter maior volume de água. A introdução de cargas leves em teores até 5% originou ligeira melhoria no desempenho do controlo de humidade ambiente.

As amostras C apresentam comportamento muito semelhante e próximo da argamassa padrão.

A argamassa D apresenta um comportamento pouco satisfatório, apesar de ser expectável uma melhoria da capacidade de controlo de humidade em relação às amostras A, B1 e C1.

Entre as amostras E a que melhor desempenho apresenta é a E3 (MBV=2,53), atingindo a classificação máxima de excelente (tabela 2). Com o incremento do teor de poliacrilato de sódio observou-se uma melhoria significativa nos valores de MBV. Estes resultados são alcançados devido ao facto de o poliacrilato de sódio possuir elevada capacidade de adsorção de humidade.

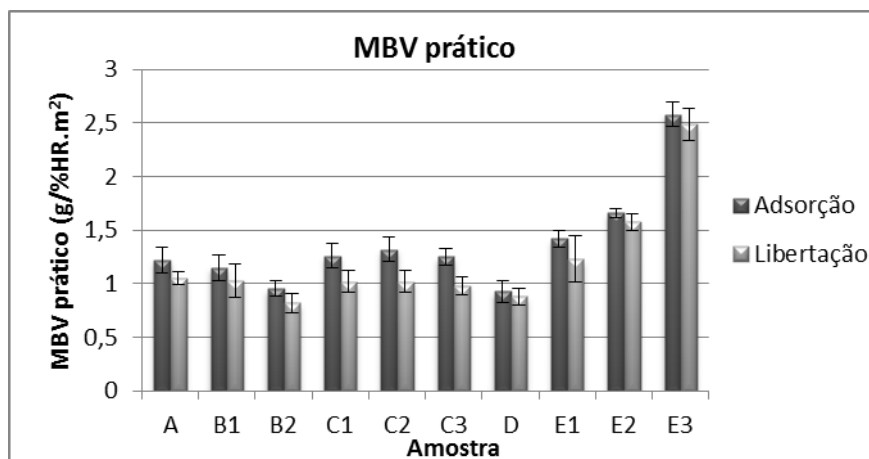


**Figura 66:** Valores de MBV prático das amostras curadas 28 dias.

A figura 67 compara o comportamento das amostras nos processos de adsorção e libertação de humidade e realça o superior desempenho dos materiais na fase de retenção. As diferenças são mais acentuadas em formulações contendo agentes expansivos, sugerindo que não basta criar poros no interior da argamassa para garantir o seu bom



desempenho. A capacidade intrínseca de adsorção dos adjuvantes, de natureza química ou determinada por parâmetros de índole física e morfológica (forma menos esférica das partículas, pequenez das partículas, porosidade intrínseca), parece desempenhar um papel relevante.



**Figura 67:** Valores de MBV estimados nas fases de adsorção e de libertação de humidade para as argamassas em estudo.

#### 4.3.11. Condutividade térmica

O destaque dado a esta propriedade das argamassas, no estado endurecido, deve-se ao facto das acções tomadas compreendem sempre um aumento de porosidade o que, por inerência, se poderia reflectir em variações da condutividade térmica.

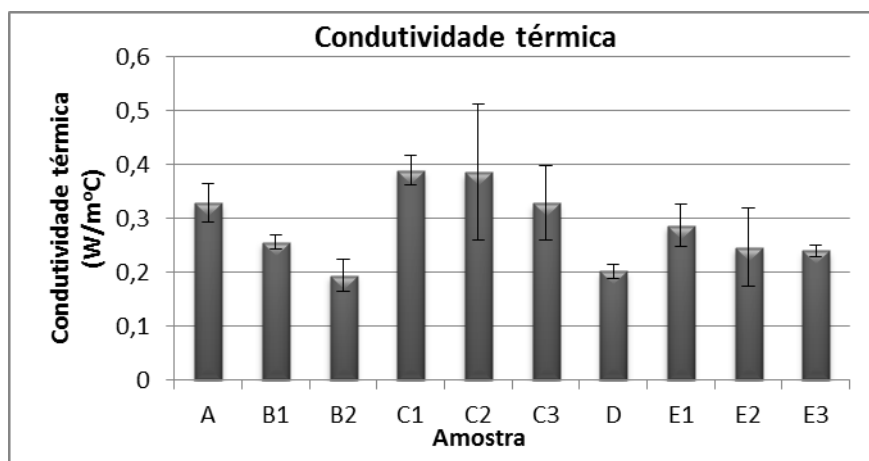
O acréscimo da capacidade de ajuste da humidade relativa das argamassas foi conseguido com a incorporação de agentes porogéneos no material ou pelo incremento da sua porosidade interna. Por isso, é de prever um incremento da capacidade de isolamento térmico dos materiais, aferido por medições de condutividade térmica (figura 68).

As amostras C1 e C2 são as que apresentam superior condutividade térmica, enquanto as argamassas B2 e D se revelam melhores isolantes de calor. Em relação à argamassa padrão, só as formulações C, contendo agentes expansivos, possuem valores de condutividade superiores.

O efeito do teor em cargas leves no acréscimo de isolamento está bem patente com o uso de vermiculite expandida (amostras B). A criação de porosidade e o controlo do seu tamanho médio limita a transferência de calor no material, que ocorre através do movimento vibracional dos átomos constituintes.

Este efeito poderá ser condicionado pela natureza do agente expansivo ou porogéneo. Nas amostras C o agente expansivo é de natureza metálica, ou seja, ele próprio condutor de calor. Finalmente, deve lembrar-se que a criação de porosidade na argamassa depende fortemente das condições de preparação da mesma (homogeneidade da mistura, incorporação de ar, teor de água de amassadura) e do processo de hidratação/endurecimento da fase ligante, factores que podem mascarar a simples e previsível acção da natureza e teor do agente porogéneo utilizado. Finalmente, a retenção de humidade demonstrada por algumas amostras pode também afectar as medições, uma vez que estas decorrem em ambiente natural não controlado.

A amostra D contém 5% de vermiculite expandida e 0,1% de agente expansivo e, por isso, a sua condutividade térmica é próxima das amostras B.



**Figura 68:** Resultados da condutividade térmica das várias formulações após 28 dias de cura.

As amostras E apresentam valores de condutividade mais próximos do que se esperava, com a diminuição de E1 para E3 à medida que se incrementa o teor de poliacrilato de sódio.

## 5. Conclusão e propostas de trabalho futuro

Partiu-se de uma argamassa bastarda (cal aérea e cimento) que foi designada como amostra padrão e à qual se adicionou vários adjuvantes (vermiculite expandida, pós expansivos de alumínio e poliacrilato de sódio) em distintas proporções, de modo a avaliar a capacidade de controlo de humidade em meios fechados.

Devido às aproximações realizadas ao método NordTest, nomeadamente na área de exposição e espessura das amostras, não foi possível aferir o rigor dos resultados obtidos. Das três amostras avaliadas, apenas a amostra de gesso apresentou um resultado próximo do tabelado. Por isso, a análise efectuada neste trabalho às argamassas preparadas é meramente comparativa.

Todos os adjuvantes utilizados neste trabalho foram incorporados com o objectivo de aumentar a porosidade das amostras. Assim sendo, este facto juntamente com a % de água utilizada na amassadura, que parcialmente evapora durante a cura deixando vazios, é responsável pelas alterações de resistência mecânica, pelo desempenho no controlo de humidade e transferência de calor.

A análise de porosimetria indica que as amostras D e E2 são as únicas que apresentam um incremento de porosidade em relação à amostra padrão. No entanto, a análise das amostras E pode não ser totalmente correcta uma vez que uma fracção do poliacrilato de sódio pode ter sofrido expansão.

Em relação aos ensaios mecânicos (módulo de elasticidade, resistência à compressão e flexão), as amostras D e E3 são as mais frágeis, em sintonia com os valores de densidade e com a sua estrutura porosa. As amostras E1 e E2 são as mais rígidas e resistentes.

Relativamente ao coeficiente de absorção por capilaridade a amostra D apresenta um desempenho assinalável, mas as amostras E apresentam resultados ligeiramente inferiores à amostra padrão.

Todas as amostras (excepto A) apresentam valores do coeficiente de resistência à difusão de vapor inferiores ao esperado, o que sugere existir reduzida fracção de poros interligados e prevalência de poros de maior dimensão.

As amostras em que se adicionou cargas leves e poliacrilato de sódio são as que apresentam maior capacidade de retenção de água, em especial a amostra E3. Esta amostra é também a que atinge o ponto de saturação mais rapidamente, contrastando com E1 e E2. Quanto ao processo de libertação de água, as amostras E1 e E2 são as que finalizam esta etapa mais rapidamente em contraste com a amostra padrão.

O aumento do teor de poliacrilato de sódio nas formulações causa uma melhoria proporcional nos valores de MBV. A amostra E3 (2,53) com 2% de poliacrilato de sódio foi a única a atingir a classificação de excelente. No entanto, todas as outras apresentam classificação de nível bom, incluindo a amostra padrão. Verificou-se, contudo, que todas as amostras apresentam maior facilidade em absorver humidade do que na sua libertação o que, em casos extremos ou uso prolongado, poderá conduzir à sua saturação. Ainda assim, a velocidade de absorção de humidade é semelhante à velocidade de libertação.

Verifica-se que não existe uma relação directa entre os valores de MBV prático com os coeficientes de capilaridade e a resistência à difusão de vapor. Tal facto acontece devido às alterações estruturais provocadas pela adição de adjuvantes. Em relação à amostra D esperar-se-ia um valor superior de MBV pois é a que apresenta o coeficiente de capilaridade superior, aliado a reduzido coeficiente de resistência à difusão de vapor. A introdução de poliacrilato de sódio (amostras E) e o seu comportamento em contacto com água complica a análise do seu comportamento, recomendando estudos posteriores de análise microestrutural.

Relativamente aos resultados de condutividade térmica observou-se que apenas as amostras C apresentam valores superiores à amostra padrão, havendo nas restantes um claro reforço do carácter isolante. Sendo esta propriedade directamente dependente da porosidade das amostras, verifica-se aumento com o teor em cargas leves e poliacrilato de sódio. A amostra D apresenta um comportamento curioso, pois apesar de ter na sua

formulação 5% de vermiculite expandida foi-lhe também adicionado 0,1% de pós expansivos de alumínio, apresentando um resultado inferior a B1.

Comparando os resultados dos valores de MBV prático deste trabalho com os obtidos por Gonçalves [8], nomeadamente para as amostras com a mesma % de adjuvante (padrão + 5% de vermiculite expandida e padrão + 0,1% de agentes expansivos), verifica-se alguma repetibilidade (o mesmo com a amostra padrão). Por sua vez, quando se adicionou poliacrilato de sódio observa-se uma melhoria significativa nos valores de controlo de humidade.

Num trabalho futuro de continuidade de estudo desta temática seria interessante usar amostras com as medidas e formatos recomendados pelo NordTest, de forma a poder aferir o desempenho absoluto das amostras.

Seria também interessante desenvolver novas formulações com poliacrilato de sódio, nomeadamente com teores a variar entre 1 e 2%. Este estudo deveria ser complementado com a adição de outros adjuvantes comuns, em especial agentes retardadores de presa, de forma a contrariar o facto de o poliacrilato de sódio reduzir substancialmente o tempo de presa e consequente acentuada perda de trabalhabilidade. Sugere-se também uma análise microestrutural detalhada destas amostras, de forma a esclarecer o efeito do poliacrilato de sódio quando em contacto com água, principalmente no que se refere ao ‘‘corte’’ de canais porosos.

Outra avaliação que se sugere é a verificação do comportamento destas amostras a longo prazo e perante ciclos em número muito superior, sobretudo para aferir a possibilidade indesejável de saturação.

## 6. Bibliografia

- [1] Penas, F., ‘*Argamassas de cal hidráulica para revestimento de paredes*’, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- [2] Paulo, R., ‘*Caracterização de argamassas industriais*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, 2006.
- [3] Marques, S., ‘*Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, 2005.
- [4] Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S., ‘*Composite materials in ancient structures*’, *Cement & Concrete Composites*, 27, 2005, 295-300.
- [5] <http://www.projetosengenharia.com/alvenaria-tijolo-comum.php>, acessado a 02/03/2011.
- [6] <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/146/imprime139048.asp>, acessado a 02/03/2011.
- [7] <http://rufos.com.br/argamassa-e-cimentcola/argamassa.php>, acessado a 02/03/2011.
- [8] Gonçalves, H., ‘*Revestimento de parede como componente passivo para controlo de humidade ambiente*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, 2010.
- [9] Smith, M., Collins, L., ‘*Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes – 3<sup>rd</sup> edition*’, Geological Society, London, Engineering Geology Special Edition, 1993.
- [10] Illston, J., Domone, P., ‘*Construction materials: their nature and behavior – 3<sup>rd</sup> edition*’, Spon Press, New York, 2001.
- [11] Aitcin, P., ‘*Binders for durable and sustainable concrete*’, Modern Concrete Technology, New York, 2008.
- [12] Griesser, A., ‘*Cement-superplasticizer interactions at ambient temperature*’, Doctoral Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2002.
- [13] Hewlett, P., ‘*Lea’s chemistry of cement and concrete - 4<sup>rd</sup> edition*’, Elsevier Science & Technology Books, UK, 2004.
- [14] Rodrigues, D., ‘*Influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

- [15] Miguel, P., ‘*Desenvolvimento de argamassas de reabilitação de edifícios em adobe*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2008.
- [16] Mendonça, B., ‘*Estudo do desempenho das argamassas hidráulicas*’, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [17] Chatterjee, K., ‘*Uses of industrial minerals, rocks and freshwater*’, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2009.
- [18] Fleming, E., ‘*Construction technology – an illustrated introduction*’, Blackwell Publishing, UK, 2005.
- [19] Rixon, R., Mailvaganam, N., ‘*Chemical admixtures for concrete – 3<sup>rd</sup> edition*’, E&FN Spon, UK, 2001.
- [20]<http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=2528&target=Vermiculite>, acedido a 25/02/2011.
- [21][http://www.supplierlist.com/photo\\_images/167022/vermiculite.jpg](http://www.supplierlist.com/photo_images/167022/vermiculite.jpg), acedido a 25/02/2011.
- [22] Mouzdahir, Y., Elmchaouri, A., Mahboub, R., Gil, A., Korili, S., ‘*Synthesys of nano-layered vermiculite of low density by thermal treatment*’, Powder Technology, 189, 2009, 2-5.
- [23]<http://www.refratil.com.br/main.php?exec=swpage.php&id=25>, acedido a 25/02/2011.
- [24] Hwang, J., Song, X., ‘*Replacing Al powder with Al slag or recycling foil in cellular concrete*’, Innovations in aluminum, Part II, 1997, 29-30.
- [25]<http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/jtenorio/larex/trabalhos/Producao%20de%20Concreto.pdf>, acedido a 01/03/2011.
- [26] Ishikawa, P., ‘*Utilização do resíduo de britagem de rocha e de pó de alumínio reciclado na produção de concreto celular*’, Faculdade de Tecnologia de São Paulo – Departamento de Edifícios, Brasil.
- [27] Catálogo da empresa Eckart, ‘*Aluminium powder and aluminium pastes for building materials and pyrotechnics*’ – Com o seguinte sítio de internet: <http://www.eckart.net/service/brochures/functional-applications.html>, acedido a 25/08/2011.

- [28] Catálogo da empresa Flinn Scientific Inc., ‘*Sodium polyacrylate – Superabsorbent polymers*’, Catalogo nº W0012, W0013, W0014, Publication nº 755.10, Illinois, USA, 1993.
- [29] Cath, T., Childress, A., Elimelech, M., ‘*Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments*’, Journal of Membrane Science, 281, 70-87, 2006.
- [30] <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-39/RC-39.htm>, acedido a 01/03/2011.
- [31] Cerolini, S., D’Orazio, M., Di Perna, C., Stazi, A., ‘*Moisture buffering capacity of highly absorbing materials*’, Energy and Buildings, 41, 2009, 164-168.
- [32] Ramos, N., ‘*Modelação da variação da humidade relativa no interior dos edificios*’, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2000.
- [33] Yoshino, H., Mitamura, T., Hasegawa, K., ‘*Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions*’, Building and Environment, 44, 1418-1425, 2009.
- [34] Svennberg, K., ‘*Moisture buffering in the indoor environment*’, Doctoral Thesis, Department of Building Physics LTH, University of Lund, Sweden, 2006.
- [35] <http://decordesignideas.com/paredes-com-humidade>, acedido a 25/03/2011.
- [36] Hyvarinen, A., ‘*Characterizing moisture damaged buildings – and biological monitoring*’, Doctoral Thesis, Department of Environmental Sciences, University of Kuopio, Finland, 2002.
- [37] Svennberg, K., ‘*Determination of moisture properties for materials exposed to the indoor air*’, Licentiate Thesis, Department of Building Physics LTH, University of Lund, Sweden, 2003.
- [38] Burke, S., ‘*Building physics tools: needs, use and the lack of use in the building process. Modeling non-isothermal moisture flow and frost penetration*’, Doctoral Thesis, Department of Building Physics LTH, University of Lund, Sweden, 2009.
- [39] Mortensen, L., ‘*Hygrothermal microclimate on interior surfaces of the building envelope*’, Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2007.



- [40] Steskens, P., ‘*Modelling of hygrothermal interactions between the indoor air and the building envelope*’, Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2009.
- [41] Kwiatkowski, J., ‘*Moisture in buildings air-envelope interaction*’, Doctoral Thesis, Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA), L’Institut National Sciences Appliquées de Lyon, France, 2008.
- [42] Kunzel, H., Zirkebach, D., Sedlbauer, H., ‘*Predicting indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with building envelope*’, 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture, King Mongkut’s University Tonbury, Bangkok, 2003.
- [43] Freitas, V., ‘*Transferência de humidade em paredes de edifícios*’, Tese Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 1992.
- [44] Scheffler, G., ‘*Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage*’, Doctoral Thesis, Faculty of Civil Engineering, Dresden University of Technology, Germany, 2008.
- [45] Salonvaara, M., Ojanen, T., ‘*Indoor air humidity variations and its effects on the moisture performance of building envelope*’, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003.
- [46] Trechsel, H., Bomberg, M., ‘*Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention – 2<sup>nd</sup> edition*’, ASTM International, USA, 2009.
- [47] Trechsel, H., ‘*Moisture analysis and condensation control in building envelopes*’, ASTM International, USA, 2001.
- [48] Hansen, K., ‘*Sorption isotherms – A catalogue*’, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark, Denmark, 1986.
- [49] Coahn, L., ‘*Sorption hysteresis and the vapor pressure of concave surfaces*’, Journal of the American Chemical Society, 60, 433, 1983.
- [50] [http://wp.ornl.gov/sci/roofs+walls/staff/papers/new\\_119.pdf](http://wp.ornl.gov/sci/roofs+walls/staff/papers/new_119.pdf), acedido 07/04/2001.
- [51] Rode, C., ‘*Moisture buffering of building materials*’ Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2005.

- [52] Roels, S., Janssen, H., ‘*A comparison of the NordTest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials*’, Journal of Building Physics, 30, 137-161, 2006.
- [53] Rode, C., Peuhkuri, R., Time, B., Svennberg, K., Ojanen, T., ‘*Moisture buffer value of building materials*’, ASTM Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurements on Building Materials, Toronto, Canada, 2006.
- [54] Roels, S., Janssen, H., ‘*Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures*’, Energy and Buildings, 41, 382-394, 2009.
- [55] Abadie, M., Mendonça, K., ‘*Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using de moisture buffer value concept*’, Building and Environment, 44, 388-401, 2009.
- [56] Meissner, J., Mendes, N., Mendonça, K., Moura, L., ‘*A full-scale experimental set-up for evaluating the moisture buffer effects of porous material*’, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 1197-1202, 2010.
- [57] Ramos, N., Delgado, J., Freitas, V., ‘*Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building elements*’, Construction and Building Materials, 24, 2590-2597, 2010.
- [58] Groot, C., Larbi, J., ‘*The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry*’, HERON, vol. 44 (2), 1999.
- [59] Ribeiro, R., Silva, L., Ferreira, V., Labrincha, J., ‘*Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar*’, Cement & Concrete Composites, 32, 19-24, 2010.

## Anexo – Resultados do trabalho de Gonçalves [8].

Amostra	Composição
A	Padrão
B1	98% padrão + 2% vermiculite expandida
B2	95% padrão + 5% vermiculite expandida
C1	98% padrão + 2% perlite expandida
C2	95% padrão + 5% perlite expandida
D1	Padrão + 0,05% agente expansivo
D2	Padrão + 0,1% agente expansivo
E1	Padrão + 0,025% introdutor de ar
E2	Padrão + 0,05% introdutor de ar

		Tempo de Cura (dias)	Amostras									
			A	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	Unidades
Produto em fresco	% água	0	21,50	23,50	30,00	23,50	32,50	20,00	21,00	20,00	20,00	%
	Densidade	0	1,40	1,38	1,15	1,36	1,15	1,51	1,48	1,32	1,33	g/cm <sup>3</sup>
	% ar incluído	0	22,50	22,50	26,00	21,00	26,00	19,00	17,50	29,00	27,50	%
Produto endurecido	Variação de massa	7	-9,82	-9,13	-13,21	-10,96	-16,63	-8,26	-7,96	-7,92	-6,93	%
		28	-9,24	-8,53	-12,71	-10,80	-16,37	-8,20	-7,31	-7,13	-6,49	
	Variação dimensional	7	-0,82	-0,75	-0,89	-0,85	-0,99	-0,83	-0,75	-0,63	-0,56	mm/m
		28	-0,83	-0,92	-1,18	-1,05	-0,91	-1,00	-0,87	-0,71	-0,62	
	Densidade	1	1,41	1,33	1,05	1,39	1,21	1,55	1,36	1,28	1,48	g/cm <sup>3</sup>
		7	1,27	1,20	0,91	1,24	1,01	1,42	1,26	1,18	1,38	
		28	1,28	1,21	0,91	1,24	1,01	1,42	1,26	1,19	1,39	
	Módulo de elasticidade	7	7,40	6,15	5,26	7,17	4,67	8,78	6,92	6,32	5,69	Gpa
		28	7,03	5,26	4,44	6,43	3,68	9,52	7,64	6,11	6,94	
	Resistência à flexão	28	1,07	1,00	0,76	1,17	0,50	1,60	1,08	0,94	1,19	Mpa
	Resistência à compressão	28	2,26	2,58	1,03	2,28	0,65	4,00	1,11	1,73	1,89	MPa
	Coeficiente de capilaridade	28	2,28	1,73	1,83	1,44	3,36	1,12	6,32	4,18	2,54	g/(dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
	Coef. resist. à difusão vapor	28	5,70	5,61	5,17	8,13	5,18	9,60	7,36	3,68	3,68	-
	MBV	28	1,10	1,13	1,29	1,05	1,06	1,10	1,15	1,17	1,08	(g/(%HR.m <sup>2</sup> ))